

Verfahren zur grossräumigen, automatisierten Klassifikation von Schnee

Ein Beitrag zur Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der Philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von

RENÉ MURI
von Winikon (LU)

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. H. Haefner



Juris Druck + Verlag Zürich
1981



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Verfahren zur grossräumigen, automatisierten Klassifikation von Schnee

Ein Beitrag zur Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der Philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von

RENÉ MURI
von Winikon (LU)

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. H. Haefner



Juris Druck + Verlag Zürich
1981

Verfahren zur großräumigen, automatisierten
Klassifikation von Schwingen
Ein Beitrag zur Auswertung nichtlinearer Formänderungen

WALDEMAR HILDEBRANDT

Abteilung für Festkörpermechanik
der Universität zu Köln
Sonderdruck: 1981
100 Seiten, 10 Abb.



Verfahren zur großräumigen, automatisierten Klassifikation von Schwingen



ISBN 3 260 04876 6

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand am Geographischen Institut der Universität Zürich unter Leitung von Herrn Prof.Dr.H.Haefner. Ihm möchte ich für das bekundete Interesse und seine Unterstützung ganz herzlich danken.

Die Dissertation ist ein Bestandteil des Nationalfondsprojektes "Quantitative Analyse multidimensionaler Fernerkundungsdaten", das in Zusammenarbeit zwischen dem Geographischen Institut der Universität und dem Institut für Kommunikationstechnik (vormals Photographisches Institut) der ETH Zürich durchgeführt wird. Herrn Prof.Dr.W.F.Berg und Herrn Prof.Dr.O.Kübler (neuernannter Vorsteher dieses Institutes) danke ich besonders, dass ich wichtige Arbeiten an Maschinen und Apparaten des Institutes für Kommunikationstechnik ausführen durfte.

Einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit leistete Dr.F.Fasler, Geographisches Institut der Universität. Ihm sei ganz herzlich für seine aufopfernde Mühe gedankt. Ohne seine Hilfe bei Statistikproblemen und vor allem in computertechnischen Belangen wäre meine Arbeit in dieser Form nicht zustande gekommen.

Danken möchte ich auch Dr.K.Seidel, Institut für Kommunikationstechnik der ETHZ Zürich. Mit seiner Unterstützung gelang es, viele Probleme der Fernerkundung zu lösen.

Besonderer Dank gilt auch meinem Kollegen vom Geographischen Institut der Universität, PD Dr.K.Itten. Er hat mir mit vielen wertvollen Anregungen, Hinweisen und Ratschlägen tatkräftig geholfen.

Beansprucht habe ich auch die Zeit von Dr.A.Funkhouser, Institut für Kommunikationstechnik, der die Aufbelichtungsmaschine Photomation P 1700 betreut. Auch ihm danke ich herzlich.

Der Militärflugdienst machte mir die Luftbilder von Zermatt zugänglich. Herrn Oberstleutnant E.Bolli sei dafür gedankt. Herrn K. Schmitz und seinen Mitarbeitern vom Rechenzentrum der Universität möchte ich für ihre Unterstützung bei der Durchführung meiner Arbeit am Rechenzentrum danken.

Viele Anregungen erhielt ich auch von meinen Kollegen M.Gerig, Dr.J.Lichtenegger, E.Meier, Dr.R.Meier, Dr.D.Nüesch, R.Schoch, Dr.K.Stänz und Frau E.Kupka, der für die Reinschrift ganz herzlich gedankt sei.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A. EINFUEHRUNG	9
1. Einleitung	9
2. Problemstellung	11
B. GRUNDLAGEN ZUR INTERPRETATION VON SKYLAB-EREP-DATEN	13
1. Allgemeines zum Skylab-Programm	13
1.1 Skylab-Bahncharakteristika	14
2. Das Skylab-EREP-Programm	14
2.1 Einführung	14
2.2 Aufnahmesysteme	15
2.3 S 190 A Multispektrale Photokameras	15
2.4 S 192 Multispektral-Scanner (MSS)	16
2.4.1 Arbeitsweise des MSS	17
2.4.2 MSS-Aufnahmetechnik bei Skylabflügen	19
2.4.3 Pixelüberlappung	21
2.4.4 Daten vom MSS	22
2.4.5 Datenvorverarbeitung durch die NASA	22
2.5 Aufnahme der Alpen	26
3. Radiometrische Eigenschaften von Objekten	27
3.1 Einführung	27
3.2 Reflexion	28
3.3 Emission	30
4. Das Reflexionsverhalten von Schnee und Wolken	30
4.1 Das Strahlungsverhalten von Schnee	31
4.2 Reflexionsverhalten verschiedener Schneetypen	31
4.3 Reflexionsverhalten von Schnee in Schattenlage	34
4.4 Reflexionsverhalten von Wolken	36
4.5 Strahldichtevergleich von Schnee und Wolken	37
5. Problematik der Saturation	38
6. Verwendete Computer und Hilfsgeräte	39
C. PHYSISCH-GEOGRAPHISCHE CHARAKTERISIERUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	40
1. Das Untersuchungsgebiet	40
2. Das Testgebiet	41
3. Erweitertes Testgebiet	41
4. Wetterlage	44
5. Bodenkontrolle	44
6. Flugaufnahmen	45

D. METHODEN ZUR KLASSIFIKATION VON FERNERKUNDUNGSDATEN	46
1. Klassifikationsverfahren	46
1.1 Ueberwachte Methoden	47
1.1.1 Deterministische Klassifikationen	48
1.1.2 MCLAS-Algorithmus	48
1.2 Unüberwachte Methoden	50
1.2.1 Theoretische Erläuterungen zur Gruppierungs- analyse	50
1.2.2 Distanzmethoden	51
1.2.3 Das CLUS-Programm	52
E. DATENVERARBEITUNG	54
1. Einleitung	54
2. Methodisches Vorgehen	54
3. Bestimmung der Kategorien und Stichproben	56
3.1 Definitionen	56
3.2 Festlegung der im Untersuchungsgebiet auftre- tenden Oberflächeneinheiten (Landschaftselemente, Wolken)	57
3.3 Stichprobenwahl	59
3.4 Methoden zur vorläufigen Abgrenzung von Stich- proben auf MSS-Bildern	59
3.5 Stichprobenumfang	61
3.6 Statistische Stichprobenanalyse	62
3.6.1 Vorgehen	62
3.7 Kategorienstatistik	65
3.8 Sekundäre Stichprobenwahl	66
3.9 Zuordnung der Kategorien zu den Hauptkategorien	66
4. Klassifikationen	70
4.1 DCLAS-Algorithmus	70
4.1.1 Stichprobenklassifikation	70
4.1.2 Klassifikation des Testgebietes	73
4.2 MCLAS-Algorithmus	76
4.2.1 Künstliche Einbeziehung von "Korrektur"- Bildelementen in die "Problem"-Kategorien	77
4.2.2 Merge-Verfahren	81
5. Kanalselektion	85
5.1 Ablauf des Kanalselektionsverfahrens	85
5.2 Vorgehen	88
5.3 Klassifikationen mit reduzierter Kanalzahl	92
6. Kategorienreduktion	94
6.1 Vorgehen	94
6.1.1 Vergleich von Kategorien mit F-Tests	95
6.1.2 Abstandsvergleich der Kategorien mit Distanztabelle	95
6.2 Kanalselektion mit reduzierter Kategorienzahl	101
6.3 Probleme des thermalen Infrarotbereiches	102

6.4 Klassifikationen mit reduzierter Kategorienzahl	104
6.4.1 MCLAS- und DCLAS-Klassifikationen mit 23 Klassen	104
6.4.2 MCLAS- und DCLAS-Klassifikationen mit 5 Kanälen	106
7. Cluster-Klassifikation	109
7.1 Verwendungsmöglichkeiten	111
8. Inkremente	112
9. Grundlagen zur Ueberprüfung der Klassifikationsresultate	113
9.1 Herstellung der Bodenkarte	113
9.1.1 Einzeichnen der Wolkenschleier	114
10. Digitaler Vergleich Bodenbild - Klassifikation	116
10.1 Voraussetzungen	116
10.2 Vergleich	117
11. Analoger Vergleich	118
11.1 Ausmessen der Schnee-Eis-Flächen	118
11.2 Resultatsübersicht der Flächenmessung aller Klassifikationen	118
11.3 Quantitativer Vergleich der Schnee-Eis-Flächen der 6 Klassifikationsergebnisse mit der Bodenkarte	120
11.4 Räumlicher Vergeich einzelner Klassifikationen mit der Bodenkarte	121
11.5 Glätten ("Smoothing")	122
11.5.1 Vorgehen	122
11.6 Ueberlagerung Klassifikation - Bodenbild	124
11.6.1 Geometrische Korrektur der Klassifikationsergebnisse	125
11.6.2 MCLAS 42 Kategorien / 8 Kanäle	126
11.6.3 MCLAS 23 Klassen / 5 Kanäle	128
11.6.4 DCLAS 23 Klassen / 5 Kanäle	129
12. Digitaler Vergleich zweier Klassifikationen	131
13. Zeitaufwand, Kosten	133
14. Grossflächige Kartierungen	135
14.1 Einleitung	135
14.2 Ueberprüfung der im erweiterten Testgebiet festgelegten Klassifikationsparameter	136
14.3 Klassifikation des gesamten Untersuchungsgebietes	139
14.3.1 Qualitative Prüfung der Klassifikationen mit topographischen Landeskarten und S 190 A - Photographien	141
15. Problematik der Schattenpartien	142
16. Uebersicht über die verwendeten Computerprogramme	146

F. ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN UND AUSBLICK	148
G. ZUSAMMENFASSUNG	151
H. LITERATURVERZEICHNIS	154
LEBENS LAUF	

A. EINFUEHRUNG

1. Einleitung

Im Rahmen eines Nationalfondsprojektes (Quantitative Analyse multidimensionaler Fernerkundungsdaten) beschäftigt sich das Geographische Institut der Universität Zürich in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kommunikationstechnik ETHZ (ehemals Photographisches Institut ETHZ) und dem Geographischen Institut ETHZ seit einiger Zeit mit dem Problem der Schneeflächenkartierung unter Verwendung von Satellitendaten.

Die Schneeflächen sollen als Parameter in Schneeabflussmodellen benutzt werden. Die Abflussmodelle ihrerseits werden dazu benötigt, eine frühzeitige Prognose des Abflusses aus dem Schneepotential zu liefern, damit eine effizientere Ausnützung eines beschränkten Wasserangebotes z.B. für die Elektrizitätserzeugung gewährleistet ist. In den vergangenen Jahren ist eine ganze Reihe von Abflussmodellen entwickelt worden, die über die zu erwartende Schneeschmelzwassermenge im voraus Auskunft zu geben vermögen. Die meisten dieser Abflussmodelle messen dem Parameter "Schneefläche" eine entscheidende Bedeutung bei. Experimente mit derartigen Modellen haben Elektrizitätswerken in Norwegen schon bedeutende Einsparungen gebracht (ØDEGAARD, 1974).

Die Schneebedeckung im Gebirge verändert sich vor allem in den Monaten der Schneeschmelze stark (in unseren Breitengraden vom Mai bis Juli). Es ist darum notwendig, von dieser Zeitphase gute Kenntnisse über die jeweilige Lage der Schneegrenze zu besitzen und ganze Einzugsgebiete permanent zu erfassen.

Für diese Aufgabenstellungen eignen sich die Verfahren der Fernerkundung (Remote Sensing) ganz besonders, können doch mit terrestrischen Mitteln Schneeflächen-Veränderungen kaum operationell erfasst werden.

Seit einigen Jahren werden von Erderkundungssatelliten (Bsp. Landsat) Daten geliefert, die für Schneekartierungsprojekte von grösstem Wert sind, weil kontinuierlich in periodischen Zeitabständen die zu beobachtenden z.T. grossflächigen Gebiete mit relativ hoher Bodenauflösung aufgenommen werden können. Dadurch wird es möglich, räumlich-zeitliche Veränderungen mitzuverfolgen. Mit den sehr teuren und radial verzerrten Luftbildern kann eine derartige Aufgabe nicht mehr rationell gelöst werden.

Um das von den Satelliten anfallende Datenmaterial verarbeiten zu können, bieten sich verschiedene Interpretationsverfahren an. Neben den traditionellen optisch-manuellen, den weiterentwickelten optisch-elektronischen Methoden werden seit einigen

Jahren auch automatisierte digitale Verfahren angewandt (HAEFNER/MURI, 1978). Die zuletzt genannten Verarbeitungsmöglichkeiten werden es erst erlauben, den in Zukunft enorm anwachsenden Datenanfall in einer operationellen Verarbeitung bewältigen zu können. Daneben weist die digitale Verarbeitung wegen ihrer Schnelligkeit, quantitativen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit Vorteile gegenüber den konventionellen, analogen Methoden auf. Die Arbeiten, die bisher am Geographischen Institut der Universität Zürich mit digitalen Verfahren durchgeführt wurden, müssen ausschliesslich als Grundlagen-Untersuchungen eingestuft werden (GFELLER, 1975; MURI, 1976; STIRNE-MANN, 1977; URFER, 1978).

Für die digitale Verarbeitung von Satellitendaten wurde am Institut eigens eine umfangreiche Programmbibliothek erstellt (IBIS = Interaktives Bildinterpretationssystem). Dieses von Dr.F.FASLER entwickelte System ermöglicht es, Satellitendaten aufzuarbeiten, statistisch auszuwerten und nachher mit Hilfe verschiedener Algorithmen zu klassieren.

Die Grundlagenforschung für eine automatisierte Schneeflächenkartierung konnte inzwischen so weit vorangetrieben werden, dass an eine Weiterführung der Arbeit in Richtung operationelle Verarbeitung gedacht werden kann. So zeigten Versuche, digital klassierte Schneeflächen in ein von Dr.J.MARTINEC, Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos, entwickeltes Abflussmodell einzubeziehen, einen guten Erfolg. Der grosse computertechnische Aufwand und die hohen Computerkosten gaben aber zu erkennen, dass bis zur operationellen Anwendung noch ein weiter Weg zurückzulegen ist.

2. PROBLEMSTELLUNG

Die Forschung auf dem Gebiete der automatisierten Schneeflächenkartierung muss, trotz grosser Fortschritte in der Vergangenheit, für eine erfolgreiche, operationelle Anwendung noch wichtige Fragen klären.

In erster Linie handelt es sich dabei um computertechnische Probleme zur Verbesserung der Klassifikationsmethoden. Für eine praktische Anwendung von Schneeflächenkartierungen muss eine umfassende Programmbibliothek zur Verfügung stehen, die grossen Leistungsanforderungen gerecht werden sollte. Diese Anforderungen beziehen sich hauptsächlich auf den extrem grossen Datenanfall, was programmtechnische und davon abhängig, kostentechnische Probleme ergibt. Diese Probleme waren auch ausschlaggebend, dass bis jetzt hauptsächlich in relativ kleinen Gebieten gearbeitet werden musste. Mit Satellitendaten sollten aber vorab grössere Gebietseinheiten exakt und kostensparend klassiert werden können. In dieser Arbeit soll darum versucht werden, mit der uns zur Verfügung stehenden Programmbibliothek IBIS eine möglichst genaue aber kostensparende Methode der digitalen Schneeflächenkartierung im Gebirge zu erarbeiten.

Dies bedingt, dass für die Vorverarbeitungsstufe die schon bestehenden Umformatierungsprogramme in der Art ergänzt werden, dass auch grosse Datenmengen mit den zur Verfügung stehenden Computern und Computerprogrammen verarbeitet werden können. Erst mit den entsprechend aufgearbeiteten Daten können dann die notwendigen Klassifikationen durchgeführt werden.

Voraussetzung für eine exakte Klassifikation ist ein geeigneter Klassifikationsalgorithmus. Je nach Problemstellung kann sich ein Klassifikator gut oder weniger gut eignen. Ein Hauptproblem stellt sich also in der Evaluation des geeignetsten Klassifikationsalgorithmus für grossräumige Schneeflächenkartierungen (d.h. der Algorithmus muss Schneeflächen exakt und mit geringem computertechnischem Aufwand gegen schneefreie Zonen abgrenzen können). Zu diesem Zwecke werden verschiedene Algorithmen auf ihre Eignung getestet. Dabei sollen Klassifikationen von "überwachten" als auch von "nicht überwachten" Verfahren analysiert werden.

Da Computerzeit teuer ist, müssen die Kosten für Klassifikationen, wie oben erwähnt, so niedrig wie möglich gehalten werden, damit die automatisierte, grossräumige Schneeflächenkartierung für eine operationelle Anwendung in Zukunft überhaupt in Betracht gezogen werden kann.

Deshalb müssen in einem nächsten Schritt die für eine Klassifikation unerlässlichen Spektralkanäle ermittelt und die für die überwachten Verfahren notwendigen Untersuchungskategorien so

weit wie möglich reduziert werden. Es gilt, entsprechende Methoden für eine Kanalselektion und Kategorienreduktion zu entwickeln.

Eine systematische Abklärung dieser grundlegenden Fragen bedingt, dass Datenmaterial verfügbar sein muss, das eine umfassendere Bildanalyse gewährleisten kann als es mit Landsat-Daten möglich ist. Deshalb wurden die Multispektralscannerdaten von Skylab, die 13 verschiedene Spektralbereiche beinhalten, als Unterlage ausgewählt. Der Skylab-MSS kann uns für unsere Grundlagenforschung wesentlich mehr Informationen über eine bestimmte Bodenfläche als der Landsat-MSS zur Verfügung stellen.

Das Arbeiten mit einem erhöhten Informationsangebot ist aber nur dann sinnvoll, wenn man weiss, dass in Zukunft Satelliten gestartet werden sollen, die ungefähr das gleiche Wellenlängenangebot aufweisen. Nach Angaben der NASA wird das schon in naher Zukunft der Fall sein.

Bei Arbeiten in dieser grundlegenden Phase der digitalen Verarbeitung von Satellitendaten sollten so viele Informationen wie möglich über den Zustand der Erdoberfläche und Atmosphäre vorhanden sein oder gemessen werden. Denn je mehr Informationen bei der Verarbeitung zur Verfügung stehen, umso eher werden exakte, aussagekräftige Untersuchungsergebnisse geliefert werden können. Die hochauflösenden Farbphotographien, die von den Astronauten an Bord von Skylab gleichzeitig mit den MSS-Aufnahmen gemacht wurden, können wertvolle Kontrollinformationen liefern (Bsp. genaue Identifikation von Wolkenschleiern). Neben diesen Farbphotographien existieren auch grossmassstäbige Luftbilder, die zur Zeit des Ueberfluges von Skylab aufgenommen wurden.

Bei der Bearbeitung des in der vorliegenden Arbeit geforderten Zieles einer grossräumigen Schneeflächenkartierung wird so vorgegangen, dass die Detailuntersuchungen (Stichprobenanalyse, Auswahl der Klassifikationsalgorithmen, Kanalselektion, Kategorienreduktion etc.) vorerst aus computer- und kostentechnischen Gründen in einem kleinen Testgebiet durchgeführt werden. Die aus diesen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse müssen dann in einem Zwischenschritt in einem erweiterten Testgebiet überprüft werden. Erst ganz am Schluss der Arbeit wird mit den ausgewählten und überprüften Vorlagen das ganze, grossräumige Untersuchungsgebiet klassiert.

B. GRUNDLAGEN ZUR INTERPRETATION VON SKYLAB-EREP-DATEN

1. Allgemeines zum Skylab-Programm

Mit dem Start der bemannten Raumstation Skylab zu Beginn des Jahres 1973 konnte ein reichhaltiges, wissenschaftliches Programm begonnen werden. Das Forschungsprogramm beschränkte sich dabei nicht nur auf erdorientierte Experimente (EREP-Programm = Earth Resources Experiment Package), bei dem u.a. neue Geräte für die Erderkundung erforscht und erdkundliche Untersuchungen mit verschiedenen Aufnahmesystemen durchgeführt werden sollten, sondern führte auch raumorientierte Forschungsarbeiten (z.B. Untersuchung von Sonne und Sternen, Erforschung der Erdatmosphäre und des erdnahen Raumes etc.) aus. Leider konnten wegen der bekannten Panne beim Start von Skylab viele der geplanten Experimente nicht mehr oder nur in reduziertem Umfang durchgeführt werden¹⁾. Dennoch konnte von den Astronauten, wie die nachfolgende Uebersicht zeigt, sehr viel Datenmaterial zur Erde zurückgebracht werden.

Uebersicht über das Skylab-Programm

- | | |
|-------------------|---|
| <u>1. Mission</u> | (offizieller Name: SL-1): 14. Mai 1973; Start des unbemannten Himmelslabors. |
| <u>2. Mission</u> | (SL-2): 25. Mai - 22. Juni 1973; Besatzung: Conrad, Kerwin, Weitz; 5'275 Bilder und 13'716 m Magnetband von der Erde aufgenommen. |
| <u>3. Mission</u> | (SL-3): 28. Juli - 25. September 1973; Besatzung: Bean, Garriott, Lousma; 13'429 Bilder und 28'529 m Magnetband. |
| <u>4. Mission</u> | (SL-4): 16. November 1973 - 8. Februar 1974; Besatzung: Carr, Gibson, Pogue; 14'000 Bilder und 30'480 m Magnetband. |

Am 8. Februar 1974 wurde nach 3'900 Umläufen das wissenschaftliche Programm eingestellt. Im Sommer 1979 drang Skylab unkontrolliert in die Erdatmosphäre ein und wurde dabei zerstört.

1) Das Geographische Institut der Universität Zürich erhielt auch nur von einem Ueberflug, am 11. September 1973, das gesamte angeforderte Datenmaterial zugestellt.

1.1 Skylab - Bahncharakteristika

Die Umlaufbahn von Skylab hatte eine Inklination von 50° zum Äquator. Somit konnte nur das Gebiet innerhalb des 50. nördlichen und 50. südlichen Breitengrades überflogen werden. Die Flughöhe betrug ungefähr 435 km, und eine Erdumkreisung dauerte 93 Minuten. Die Ursprungsumlaufbahn wurde dabei alle fünf Tage wiederholt.

2. Das Skylab-EREP-Programm

2.1 Einführung

Von den im Kap. B.1 beschriebenen Untersuchungen interessiert hier nur das EREP-Projekt, das sich mit der Erderkundung auseinandersetzte. Es diente speziell der Erprobung und Anwendung experimenteller und operationeller Systeme der Fernerkundung. Mit Hilfe von sechs Aufnahmesystemen, die z.T. in verschiedenen Spektralbereichen arbeiteten, wurde die Oberflächenbeschaffenheit der Erde untersucht.

Im Gegensatz zu unbemannten Satelliten (Bsp. Landsat, NOAA etc.), die die Daten mit Hilfe von Übertragungssystemen zur Erde übermitteln müssen, hatte es an Bord von Skylab neben den ebenfalls vorhandenen Scanner- und Radiometer-Systemen auch Aufnahmegeräte, die Emulsions-Filmmaterial (Photographien) gebrauchten und z.T. hohe Auflösungen ermöglichten. Der Benutzer erhielt so die Möglichkeit, mit unterschiedlichem Datenmaterial seine Untersuchungen durchzuführen. Je nach Problemstellung konnte jedes der sechs Aufnahmesysteme individuell oder mit anderen synchron benutzt werden.

2.2 Aufnahmesysteme

Wie oben erwähnt, wurden sechs Aufnahmegeräte an Bord verwendet, die Handkameras der Astronauten nicht eingerechnet. Die NASA gab ihnen die folgenden Bezeichnungen:

- S 190 A Multispektrale Photokameras (sechs Kameras)
- S 190 B Photogrammetrische Kamera (Earth Terrain Camera)
- S 191 Infrarot-Spektrometer
- S 192 Multispektral-Bildabtaster (Multispektral-Scanner = (MSS))
- S 193 Mikrowellen-Radiometer, Scatterometer, Altimeter
- S 194 L-Band-Radiometer

In dieser Arbeit werden die beiden Systeme S 190 A und S 192 benutzt und deshalb im folgenden näher charakterisiert.

2.3 S 190 A Multispektrale Photokameras

Es handelte sich hierbei um sechs 70 mm-Präzisionskameras mit folgenden technischen Daten:

- Objektive: f/2.8
- Blenden-Oeffnungen: variabel bis f/16
- Brennweiten: 152 mm

Das Gesichtsfeld von 21.2° gewährte in einer Höhe von 435 km die Erfassung eines Bodenstreifens von 163 km (entspricht ungefähr einem Massstab von 1:2'900'000). Die Filmbreite beträgt 70 mm, das effektive quadratische Bild hat eine Seitenlänge von 57 mm.

Die Verschlusszeit variierte zwischen 1/400, 1/200 und 1/100 sek. Die sechs Kameras waren synchronisiert (Genauigkeit 0.4 msek). Um die Forwärtsbewegung des Satelliten zu kompensieren, konnte das Kamerasystem während der Aufnahme je nach Erfordernis 10 bis 30 mrad/sek zurückschwenken.

Es konnten Einzelphotographien oder Serien in zwei bis 20 Sekunden-Intervallen hergestellt werden. Für stereoskopisches Sehen mit einer Ueberlappung von 60 % waren Aufnahmeintervalle von 10 sek nötig. Jede der sechs Kameras war mit einem Spezialfilter ausgerüstet. Die Film-Filter-Kombinationen ermöglichten, das Bild in einem ganz bestimmten Wellenlängenbereich wiederzugeben (Tab. 1).

Kam. Nr.	Filter	Wellenlängen- bereich (μm)	Filmtyp (Kodak)	Bodenauflö- sung (m)
1	CC	0.7 - 0.8	EK 2424 (B&W in- frared)	73 - 79
2	DD	0.8 - 0.9	EK 2424 (B&W in- frared)	73 - 79
3	EE	0.5 - 0.88	EK 2443 (color infrared)	73 - 79
4	FE	0.4 - 0.7	SO-356 (hi-reso- lution color)	40 - 46
5	BB	0.6 - 0.7	SO-022 (PANATO- MICX B&W)	30 - 38
6	AA	0.5 - 0.6	SO-022 (PANATO- MICX B&W)	40 - 46

Tab. 1: Film-Filterkombination der multispektralen Photo-
kamas (SKYLAB EARTH RESOURCES DATA CATALOG, 1974)

2.4 S 192 Multispektral-Scanner (MSS)

Der Skylab-MSS ist anders aufgebaut als der eher bekannte Landsat-Scanner-Typ (LANDSAT USER'S HANDBOOK, 1975). Mit dem S 192-Scanner ist es möglich, die Erdoberfläche in 13 verschiedenen Spektralbereichen abzutasten. Gegenüber den vier Landsat-3-Kanälen bedeutete das eine enorme Erweiterung des Wellenlängen-angebotes. Neben Aufnahmemöglichkeiten im visuellen Bereich und im nahen Infrarot konnten mit dem Skylab-MSS auch im thermalen Infrarotbereich Daten gesammelt werden.

2.4.1 Arbeitsweise des MSS

Auf eine allgemeine Beschreibung eines Scanners kann verzichtet werden, da das Funktionsprinzip von Scannern in der Literatur (Bsp. BINZEGGER, 1975; NUESCH, 1977) schon ausführlich behandelt wurde. Es geht im folgenden darum, die Eigenheiten des S 192-MSS zu erläutern und mit eher bekannten Scannern (Bsp. Landsat) zu vergleichen. Während sich Skylab fortbewegte, tastete gleichzeitig ein rotierender Spiegel im Scanner das überflogene Gebiet bogenförmig quer zur Flugrichtung ab. Dieser Spiegel nahm dabei im Gegensatz zu Photographien, bei denen mit jeder Verschlussöffnung ganze Bilder erfasst werden, in derselben Zeitspanne nur kleine Teilausschnitte (sog. Bildelemente, Kap. 2.4.2) davon auf. Damit ein geregelter Abstand zwischen den abgetasteten Zeilen gewährleistet war, musste die Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels dem Verhältnis von Fortgeschwindigkeit zur Flughöhe entsprechen. Im Gegensatz zum Landsat-Scanner, der die Oberfläche zeilenweise mit einem flachen, um $\pm 2.89^\circ$ oszillierenden Spiegel, quer zur Fortbewegungsrichtung des Satelliten abtastet, rotierte der Spiegel des Skylab-MSS um eine Achse. Die Abtastbewegung folgte dabei einem Kegelmantel und bewirkte dadurch, dass jedes Objekt unter gleichem Beobachtungswinkel gemessen wurde (Kap. 2.4.2). Die geometrischen Verzerrungen, wie sie z.B. beim Landsat-Scanner entstehen, konnten so stark reduziert werden. Die Rotation des Spiegels um eine Achse bewirkte, dass die Spiegelgeschwindigkeit konstant blieb (nach SKYLAB USER'S HANDBOOK, 1971, p. 128). Der Spiegel des Landsat-Scanners hingegen muss für seine Schwenkbewegung von Null an beschleunigt und am Schluss wieder auf Null abgebremst werden. Die Folgen davon sind ungleichmässige Ueberlappungen der Bildelemente innerhalb einer Zeile. Bei kontinuierlicher Bewegung des Spiegels fällt dieser Fehler dagegen weg (LANDSAT DATA USER'S HANDBOOK, 1979).

Das optische System des Skylab-MSS ist in Fig. 1 in schematischer Darstellung wiedergegeben. Neben dem rotierenden Spiegel war der dichroische Strahlenteiler ein wichtiges Glied in der Abfolge der optischen Elemente. Hier wurde das einfallende Strahlenbündel spektral aufgeteilt. Die kürzeren Wellenlängen ($0.41\text{--}2.43\ \mu\text{m}$) wurden vom Strahlenteiler reflektiert und zu einer Sammellinse abgelenkt. Für die längeren Wellenlängen ($10.2\text{--}12.5\ \mu\text{m}$) hingegen war der Teiler durchlässig, so dass der thermale Anteil am Spektrum zu einer anderen Sammellinse und von dort zu einem Thermal-Detektor geleitet werden konnte.

Die visuellen Anteile und die nahen Infrarot-Anteile der elektromagnetischen Strahlung wurden anschliessend über Prismensysteme zerlegt und spektral getrennt von zwölf Detektoren gemessen (Tab. 2).

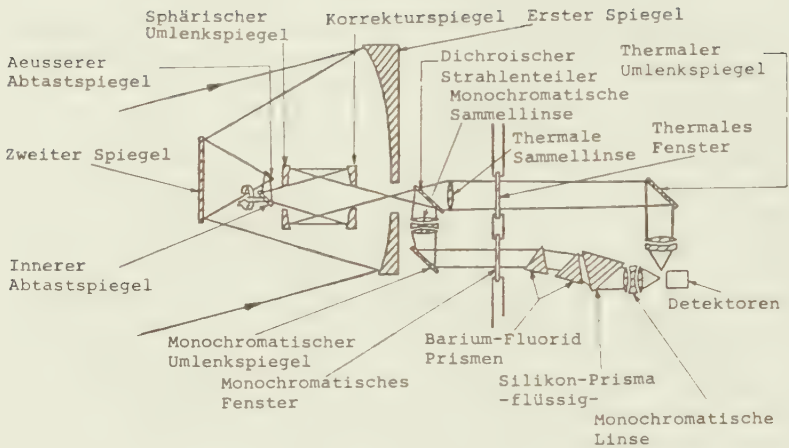


Fig. 1: Optisches System des Skylab-MSS (SKYLAB EREP
USER'S HANDBOOK, 1971, p. 53)

Jeder Detektor produzierte dabei ein elektronisches Signal, das dem mittleren Strahlungswert entspricht, der von der Erdoberfläche im Bereiche eines Bildelementes (Kap. 2.4.2) aufgenommen wurde. Dieses Signal wurde verstärkt, digitalisiert und auf einem Magnetband mit hoher Dichte aufgezeichnet (HDDT = High Density Digital Tape, ein 28 Track-Tape mit einer Dichte von 16'178 Bits per inch und einer Geschwindigkeit von 60 inches pro Sekunde).

Der Wertumfang eines Signals betrug 8 Bit. Es war also möglich, die eintreffende Strahlung in einem Umfang von 256 Wertestufen wiederzugeben (nach SKYLAB EREP USER'S HANDBOOK, 1971).

Kanal	Bereich μm	Beschreibung des Wellenlängenbereiches	Pixel/Scanlinie
1 ¹⁾	0.41-0.46	violett-blau	1240
2	0.46-0.51	blau-grün	1240
3	0.52-0.56	grün-gelb	2480
4	0.56-0.61	gelb-orange	2480
5	0.62-0.67	orange-rot	2480
6	0.68-0.76	rot	2480
7	0.78-0.88	nahes Infrarot	2480
8	0.98-1.08	nahes Infrarot	1240
9	1.09-1.19	nahes Infrarot	1240
10	1.20-1.30	nahes Infrarot	1240
11	1.55-1.75	nahes Infrarot	2480
12	2.10-2.35	nahes Infrarot	2480
13	10.20-12.5	thermales Infrarot	2480/1240

Tab. 2: Empfindlichkeitsbereiche der einzelnen Detektoren (SKYLAB EREP USER'S HANDBOOK, 1971, p. 62)

2.4.2 MSS-Aufnahmetechnik bei Skylabflügen

Wie aus Fig. 2 entnommen werden kann, war der MSS während einer 360°-Drehung des Spiegels nur im vorderen Sektor von 116.25° (nominell 110°)²⁾ aktiv. In der passiven Phase wurden die Detektoren geeicht, so dass immer zwischen zwei Scanlinien Kalibrationsdaten aufgezeichnet wurden. Für den thermalen Bereich dienten zwei Schwarzkörper als Referenzstrahler. Der eine wurde auf die tiefste, der andere auf die höchste zu erwartende Temperatur eingestellt. Für die reflektierte Strahlung standen das Licht einer spektral kalibrierten Wolfram-Lampe sowie ein Schwarzkörper zur Verfügung. Die Lampe erlaubte eine absolute Intensitätskalibrierung. Dadurch lassen sich die Werte, die in den einzelnen Kanälen gemessen wurden, mit den Daten von späteren Flügen vergleichen. Zu diesem Zwecke müssen aber, um atmosphärische Einflüsse während der Flüge zu eliminieren, zusätzlich die Globalstrahlung und der Streulichtanteil über den Untersuchungsgebieten gemessen werden.

1) Kanal 1 lieferte vollständig unbrauchbare Daten, so dass er in der weiteren Arbeit weggelassen werden musste.

2) nominell = theoretische Werte gemäss SKYLAB EREP USER'S HANDBOOK, 1971.

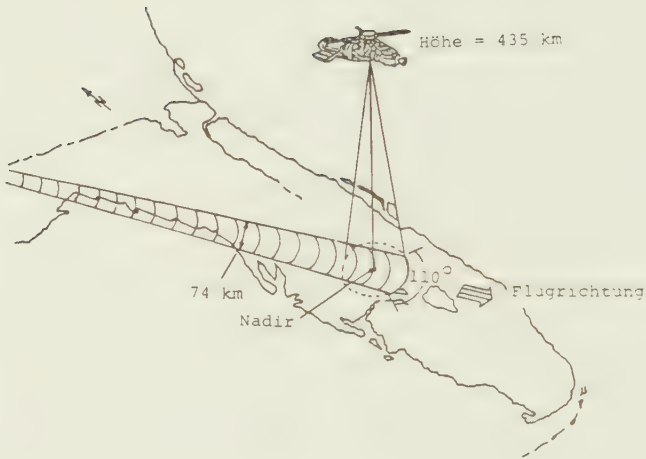


Fig. 2: Aufnahmetechnik des Multispektral-Scanners
(nach SKYLAB EARTH RESOURCES DATA CATALOG, 1974,
p. 75)

Der Öffnungswinkel des Sensors betrug 10.9° , was bei der effektiven Flughöhe von 429.6 km (nominell 435 km) einem abgetasteten Streifen von 69.5 km (nominell 74 km) entsprach.

Das momentane Gesichtsfeld (Öffnungswinkel, d.h. der Raumwinkel, aus dem der Sensor Strahlung empfängt) betrug 0.182 mrad, was einer Bodenfläche von 79×79 m entspricht (= Bildelement oder Pixel).

In einer Sekunde tastete der Sensor 94.8 Scanlinien ab. Eine Linie setzte sich in den Originaldaten je nach Detektor aus 1'240 oder aber 2'480 Bildelementen zusammen (Tab. 2).

2.4.3 Pixelüberlappung

Die dichte resp. lose Pixelanordnung (2'480 resp. 1'240 Pixel) wie sie das MSS-System lieferte, bewirkt bei der Bilddarstellung (2.4.4) eine unterschiedliche Lage der Pixel zueinander.

Bei der losen Dichte beträgt der Abstand der Mittelpunkte der quadratischen Pixel nominell 72.6 m, was eine Ueberlappung von ca. 3 m ergibt (Fig. 3).

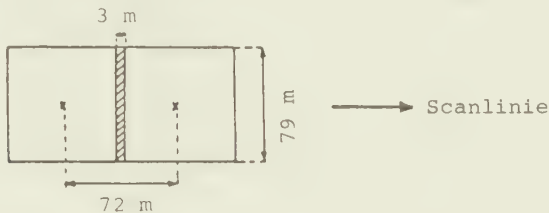


Fig. 3: Pixelüberlappung bei loser Anordnung der Daten

Bei der hohen Dichte wird der Abstand der Zentren zueinander nochmals geteilt, so dass der Abstand der Mittelpunkte nominell noch 36.3 m beträgt.

Da der Öffnungswinkel der Detektoren unabhängig von der losen oder dichten Pixelanordnung nominell bei 79 m lag, bewirkt diese Verdoppelung der Pixelzahl pro Scanlinie keineswegs eine Verbesserung des Auflösungsvermögens oder des Kontrastes. Der Vorteil der dichten Anordnung liegt aber darin, dass das Bild dichter und satter wirkt.

Die Pixel überlappen aber nicht nur seitlich, sondern auch zwischen den Scanlinien mit einer Ueberdeckung von nominell 6.7 m (Fig. 4).

In dieser Arbeit wird nur mit der losen Pixelanordnung gearbeitet. Da die effektive Flughöhe von Skylab etwas von der nominellen abwich, veränderte sich dementsprechend auch die effektive Pixelgrösse. Die für spätere Flächenberechnungen wichtigen Pixeldimensionen betragen entsprechend:

in Kolonnenrichtung: 67.6 m
in Zeilenrichtung: 72.3 m

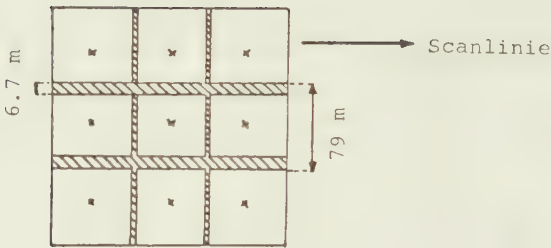


Fig. 4: Pixel- und Scanlinienüberlappung bei loser Anordnung.

2.4.4 Daten vom MSS

Die MSS-Daten wurden im Skylab gespeichert und die Magnetbänder von den Astronauten zur Erde zurückgebracht. Der Benutzer konnte die Daten dann in Rohform ("raw data") oder, wie in Kap. 2.4.5 beschrieben, in bearbeiteter Form ("processed data") von der NASA beziehen. Unsere Arbeit basiert auf "processed data", davon wurden auch photographische Abbildungen erstellt (Kap. E.11.6).

2.4.5 Datenvorverarbeitung durch die NASA

Die Rohdaten wurden nach zwei Gesichtspunkten abgeändert, was von der NASA unter dem Ausdruck "scan line straightening" beschrieben wird.

1. Skew Removal (Versetzung von Scanlinien)

Die Geschwindigkeit V_S in der Orbit-Ebene schneidet einen bestimmten Breitenkreis unter einem Winkel β . Infolge der Rotationsgeschwindigkeit der Erde V_R resultiert für die Bewegung des Subsattellitenpunktes auf der Erdoberfläche ("ground track" oder Nadirlinie) ein Geschwindigkeitsvektor V_G , der den obgenannten Breitenkreis unter einem Winkel α schneidet (Fig. 5).

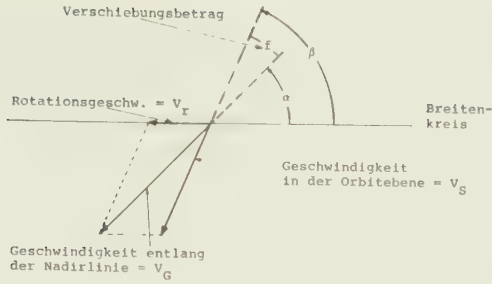


Fig. 5: Vergleich der Fortbewegungsrichtung des Satelliten mit dem Subsatellitenpunkt auf der Erdoberfläche (nach GREBOWSKI, 1971, p. 2)

Die Scanlinien werden halbkreisförmig abgebildet. Die Mittelpunkte der abgetasteten Linien liegen auf der effektiven Nadirlinie auf der Erdoberfläche, die mit der Spurlinie der Orbitebene einen Winkel $\beta - \alpha$ bildet. Die einzelnen Scanlinien wurden folglich um den Betrag $\beta - \alpha = f$ verschoben. Die zweite Veränderung, eine Koordinatensystem-Transformation, wird im folgenden Abschnitt besprochen.

2. Mapping Transformation (Strecken der gebogenen Scanlinien)

Das Aufnahmeverfahren mit einem rotierenden Spiegel bewirkt, dass die Scanlinie (Zeile) halbkreisförmig aufgespeichert wird.

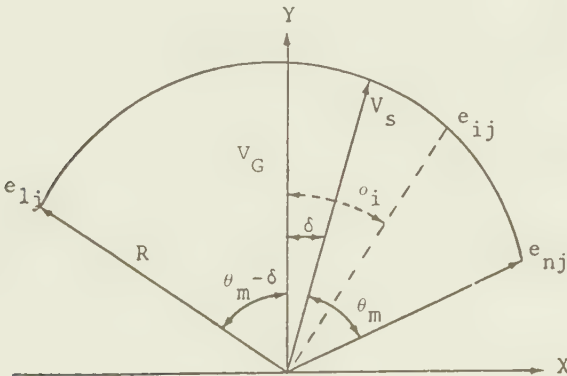


Fig. 6: Geometrische Beziehungen zwischen der gebogenen und gestreckten Scanlinie (nach SKYLAB EARTH RESOURCES DATA CATALOG, 1974)

Fig. 6 zeigt die Beziehung zwischen einer solchen Scanlinie (von e_{1j} bis e_{nj} , entlang dem Arcus $+ \theta_m$, in Richtung V_S) und der geraden Scanlinie, die parallel zur X-Achse liegt. Als V_S wird der Bodengeschwindigkeits-Vektor, bezogen auf eine nicht-rotierende Erde, bezeichnet. Da sich die Y-Achse entlang der Nadirlinie V_G erstreckt, ist jede halbkreisförmig dargestellte Scanlinie gleich orientiert wie die in Fig. 6 aufgezeichnete.

Das nachfolgende Verfahren zeigt nun, wie eine gebogene Scanlinie in eine gerade transformiert werden kann (Voraussetzung für eine kartographische Wiedergabe):

- Berechnung der Koordinaten e_{ij} (i-tes Bildelement in der j-ten Scanlinie):

$$X_{ij} = (R/P) (\sin \phi_i)$$

$$Y_{ij} = (R/Q) (\cos \phi_i) + \left(\frac{i-1}{n-1}\right) \left(\frac{\theta_m}{180^\circ}\right) + (j-1)$$

wobei:

$$\phi_i = \delta + \left(\frac{2i-1-n}{n-1}\right) \theta_m$$

$$\theta_m = \text{Hälfte des maximalen Scan-Winkels}$$

$$\delta = \beta - \alpha$$

$$R = H \tan 5.5^\circ = \text{Radius der Bodenüberdeckung}$$

$$H = \text{Höhe}$$

$$Q = V_G/S$$

$$V_G = \text{Geschwindigkeit entlang der Nadirlinie}$$

$$S = \text{Abtastrate} = 94.792 \text{ Spiegelrotationen/sek}$$

$$P = (\tau R \theta_m) / [90(n-1)]$$

$$n = \text{Anzahl Pixel pro Scanlinie}$$

- Berechnung der neuen Position auf einer geraden Scanlinie für jedes auf einer halbkreisförmig dargestellten Scanlinie abgebildete Bildelement:

$$q = X_{ij} + 0.5 - f$$

$$p = Y_{ij} + 1$$

wobei:

$$f = \delta(n-1) / 2 \theta_m \quad (\text{Skew-Verschiebungsbetrag})$$

- Zuordnung des Pixels e_{ij} zu einem Element E_{qp} einer orthogonalen Scanlinien-Anordnung. In denjenigen Fällen, bei denen mehr als 1 e_{ij} in einem E_{qp} abgespeichert wird, soll das Pixel e_{ij} mit dem kleinsten Wert d_{ij} (nächster Nachbar) berücksichtigt werden:

$$d_{ij} = (x_{ij} - q + 0.5 - f)^2 + (y_{ij} - p + 1)^2$$

(nach SKYLAB USER'S HANDBOOK, 1971)

Die transformierte Scanlinie bezieht die Pixel also nicht mehr aus einer der ursprünglichen Scanlinien, sondern übernimmt die Bildelemente von verschiedenen, gebogenen Scanlinien, die aber alle die gleiche Y-Koordinate haben.

3. Pixelanordnung

Neben dem "scan-line-straightening" nahm die NASA noch einen weiteren Eingriff an den Daten vor: Jeder mit dichter Pixelanordnung aufgenommene Kanal (siehe Tab. 2) wurde in zwei Kanäle aufgeteilt, wobei der eine Kanal nur die ungeraden, der andere Kanal die geraden Pixel enthält.

2.5 Aufnahme der Alpen

Von den über den Alpen gemachten Aufnahmen ist nur der Ueberflug vom 11. September 1973, zwischen 13.16 - 13.18 Uhr GMT anwendbar.

Die Flugachse verläuft vom französischen Zentralmassiv über den Mt. Blanc, das zentrale Wallis und Tessin ins Engadin und weiter bis nach Salzburg. Die S 190 A-Photographien bedecken den ganzen genannten Abschnitt, während der S 192-MSS nur zwischen dem Mt. Blanc und Chur in Betrieb war. Aus platztechnischen Gründen mussten die Daten auf zwei Magnetbänder aufgeteilt werden, die den in Fig. 7 dargestellten Ausschnitten entsprechen. Aufnahme 1 deckt sich mit unserem Untersuchungsgebiet (Kap. C.1).



Fig. 7: MSS-Aufnahmestreifen über der Südschweiz vom 11. September 1973

Die S 190-A Photos werden ihres guten Auflösungsvermögens wegen in dieser Arbeit als Hilfsmittel zur Gebietserkennung und zur Verifikation der Klassifikationsergebnisse herangezogen. Ihr Wert steigert sich noch, weil sie sich in den Randzonen überdecken und dadurch ein stereoskopisches Betrachten erlauben.

3. Radiometrische Eigenschaften von Objekten

3.1 Einführung

Bevor auf das für diese Arbeit besonders wichtige spektrale Verhalten von Schnee und Wolken eingegangen werden kann, müssen zum allgemeinen Verständnis einige Bemerkungen zur Bedeutung der elektromagnetischen Strahlung gegeben werden. Ausführliche Literatur zu diesem Thema findet sich bei MESSERSCHMITT-BOELKOW-BLOHM, 1975 und STAENZ, 1978 etc.

Die Sonne und untergeordnet verschiedene andere Quellen strahlen elektromagnetische Energie in verschiedenen Wellenlängenbereichen aus. Trifft elektromagnetische Energie auf ein Objekt, so wird sie reflektiert, absorbiert, transmittiert und emittiert. Jedes natürliche oder künstliche Objekt zeigt je nach den Material- und Struktureigenschaften seiner Oberfläche für bestimmte Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereiche ein charakteristisches Spektralverhalten.

Es kann vorkommen, dass verschiedene Oberflächenkategorien in gewissen Spektralbereichen gleichartige Werte aufweisen. Ueber den gesamten, vom MSS abgedeckten Wellenlängenbereich (Tab. 2) werden sie aber mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht völlig übereinstimmen. Genaue Kenntnis des spektralen Reflexionsverhaltens ist daher unerlässlich, um Aussagen über Unterscheidungsmöglichkeiten und den Zustand der verschiedenen Objekte zu ermöglichen. Leider unterliegen die aus der Luft oder dem Weltraum aufgenommenen Strahlungswerte der von einer Oberfläche reflektierten resp. emittierten Strahlung störenden atmosphärischen Einflüssen. Die wichtigsten dieser Einflüsse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Veränderung der Beleuchtungsverhältnisse in der Atmosphäre (Zenitdistanz und Azimut der Sonne, Schlagschatten etc.)
- Atmosphärische Einflüsse (Streuungsprozesse, Absorption, Extinktion etc.)
- Einflüsse aus der unmittelbaren Umgebung des Objektes (Ueberstrahlung etc.) (MESSERSCHMITT-BOELKOW-BLOHM, 1973).

In den nächsten Kapiteln wird nun spezifisch auf das Reflexions- resp. Emissionsverhalten von Objekten eingegangen.

3.2 Reflexion

Um multitemporale Satellitendaten in Klassifikationsverfahren vergleichen oder durch Feldmessungen mit Radiometern überprüfen zu können, müssen die Beleuchtungsverhältnisse (Fig. 8) berücksichtigt sowie die obgenannten atmosphärischen Störeffekte eliminiert werden.

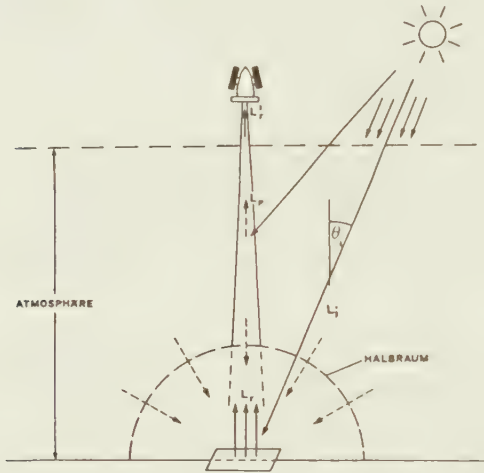


Fig. 8: Strahlungsverlauf in der Atmosphäre für Radiometer- und MSS-Messungen. Die vom Satelliten gemessene Strahlung $L_{r'}$ setzt sich aus den zwei Komponenten L_r geschwächt und L_p zusammen (nach STAENZ, 1978)

Legende:

- i, r = die Indizes zur Kennzeichnung von Einfall- und Reflexionsgeometrie
- L_i = die Strahldichte der einfallenden Strahlung mit der Dimension einer Leistung pro Flächeneinheit und Raumwinkeleinheit, z.B.
 $W \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
- L_r = die in einer bestimmten Richtung reflektierte Strahldichte ($W \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$)
- $L_{r'}$ = die vom Satelliten gemessene reflektierte Strahldichte
- L_p = Luftlicht (Streuung der einfallenden Strahlung)

Werden aber die Beleuchtungsverhältnisse in die Klassifikationsanalyse miteinbezogen, sollte bei der Beschreibung der Reflexionseigenschaften der Objekte nicht die absolute, auf den Sensor reflektierte Strahldichte, sondern der Reflexionsfaktor R benutzt werden (STAENZ, 1978).

Dieser lässt sich wie folgt definieren:

$$R(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i) = \frac{\pi \Omega_o L_r(\theta_r, \varphi_r)}{w_i \int L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$

Legende:

- i, r = die Indizes zur Kennzeichnung von Einfalls- und Reflexionsgeometrie
- L_i = die Strahldichte der einfallenden Strahlung mit der Dimension einer Leistung pro Flächeneinheit und Raumwinkeleinheit, z.B. $W \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
- L_r = die in einer bestimmten Richtung reflektierte Strahldichte ($W \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$)
- w_i = Einfallshalbraum
- Ω_o = Einheitsraumwinkel
- θ_r = Nadirdistanz (Beobachtungswinkel)
- φ_r = Azimut der Beobachtungsrichtung
- θ_i = Sonnenzenitdistanz (Zenitdistanz)
- φ_i = Azimut der Sonne

Der Reflexionsfaktor gibt das Verhältnis in der Richtung (θ_r, φ_r) der reflektierten Strahlung bezogen auf den Halbraum (daher der Faktor π im Zähler der Gleichung) zur halbräumlich einfallenden Strahlung an (nach STAENZ, 1978).

Der Reflexionsfaktor ist von der Einstrahlungsverteilung abhängig. Er beschreibt daher die Reflexionseigenschaften von Objekten nicht eindeutig, wenn diese, wie fast alle Objekte in der Natur, anisotrop (richtungsabhängig) sind. Deshalb müssen unbedingt die Messrichtung (θ_r, φ_r) und die Sonnenzenitdistanz θ_i angegeben werden, um Vergleiche mit anderen Untersuchungsergebnissen zu ermöglichen.

3.3 Emission

Unter Wärmestrahlung (Emission) wird jene elektromagnetische Strahlung verstanden, die ihre Entstehung der absoluten Temperatur des Körpers verdankt und in ihrer Intensität und spektralen Energieverteilung nur von dieser Temperatur und der Beschaffenheit des Körpers abhängt (WESTPHAL, 1959). Die Erwärmung des Körpers durch Strahlung beruht darauf, dass die auffallende Strahlungsenergie absorbiert und in Molekularenergie, also Wärme, umgesetzt wird. Nur ein "reiner Schwarzkörper" vermag die ganze einfallende Strahlung zu absorbieren und auch wieder vollständig zu emittieren.

Ein in der Natur vorkommendes Objekt unterscheidet sich vom Schwarzkörper durch den Emissionsfaktor ϵ . Dieser Faktor hängt von der Beschaffenheit eines jeden Objektes ab. Er ist das Verhältnis der Strahlung des Objektes zur Strahlung eines Schwarzkörpers. Aus diesem Grunde ist bei der Interpretation von Wärmestrahlung Vorsicht geboten, weil gleiche Strahlungsintensität zweier Objekte nicht Identität bedeuten muss, da unterschiedliche Emissionsfaktoren und unterschiedlich einfallende Strahlung sich ergänzen können.

4. Das Reflexionsverhalten von Schnee und Wolken

In den Gebirgen der gemässigten Breiten stören Wolken oft die Schneeuntersuchungen, da sie ein ähnliches spektrales Verhalten aufweisen wie Schnee. Dank dem breitgefächerten Wellenlängenangebot, das der Skylab-MSS lieferte, bietet sich hier die Möglichkeit, das Schnee-Wolkenproblem spektral zu lösen. Deshalb wird im zweiten Teil dieses Kapitels auch auf das Spektralverhalten von Wolken eingegangen.

4.1 Das Strahlungsverhalten von Schnee

Untersuchungen von STAENZ (1976) an verschiedensten Schneetypen ergaben, dass der eine isotrope (richtungsunabhängig) Oberfläche aufweisende Schnee ein lambertianer Strahler¹⁾ ist. Eine Ausnahme bilden die unregelmässig gewellten und verschmutzten Schneeoberflächen. Die Untersuchungen ergaben weiter, dass der Schnee die einfallende Strahlung nur bis zu einem Blickwinkel von ca. 30° vollständig diffus reflektiert. Bei Blickwinkeln $> 30^\circ$ kann sich der Reflexionsfaktor merklich ändern. Für solche Blickwinkel verhält sich eine Schneefläche nicht mehr als ein vollständig diffuser Reflektor. Eiskrusten und vor allem Eisflächen zeigen wegen der glatten Oberfläche kaum mehr lambertianes Strahlungsverhalten.

Auf Grund dieser Resultate kann für Schneeuntersuchungen der folgende Schluss gezogen werden: Bei Photographien und MSS-Aufnahmen von Schnee können die Blickrichtung und auch die Lage des Messfeldes (Hangneigung und Hangexposition) für einen Blickwinkel bis zu ca. 30° vernachlässigt werden.

4.2 Reflexionsverhalten verschiedener Schneetypen

Schnee kann in sehr vielfältiger Art vorkommen. Wie Laboruntersuchungen und Feldmessungen ergaben (O'BRIAN + MUNIS, 1973; STAENZ, 1976), lassen sich die verschiedenen Schneetypen z.T. spektral unterscheiden. Für das Reflexionsverhalten einer Schneeoberfläche spielt neben dem Zustand der Oberfläche (feucht oder trocken) die Beschaffenheit der Schneeschicht eine gewisse Rolle. Dabei sind vor allem ca. die obersten 10 cm einer Schneedecke wichtig. Neben der Feuchtigkeit und Temperatur beeinflussen auch Schneedichte, Korngrösse und Kornform die Strahldichte. Mit zunehmendem Alter einer Schneedecke sind diese Faktoren erheblichen Veränderungen unterworfen.

- 1) Definition eines lambertianen Strahlers: Die Strahlungsdichte L einer homogenen Fläche erscheint einem Beobachter gleich, unabhängig von der Blickrichtung, aus der er sie beobachtet. Ist dies für eine Fläche der Fall, so sprechen wir von einem lambertianen Strahlungsverhalten oder von einer vollständig diffus reflektierten Strahlung einer Fläche.

Die Untersuchungen von STAENZ haben gezeigt, dass beim Schnee eine grosse Abhängigkeit zwischen dem Reflexionsfaktor und der Dichte besteht. So nimmt die Dichte mit steigender Feuchtigkeit und durch ständiges Auftauen und Wiedergefrieren zu, der Reflexionsfaktor hingegen ab. Dieser Einfluss lässt sich im nahen Infrarot besonders gut beobachten.

Im folgenden werden die für unsere Untersuchung wichtigen Schneetypen charakterisiert. Leider stehen mit wenigen Ausnahmen nur Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Verfügung. Unterschiede zu Messungen in der Natur sind wegen ungleicher Messbedingungen wahrscheinlich. Deshalb ist es angebracht, diese Ergebnisse mit gebührender Vorsicht zu betrachten.

1. Kalter, trockener Schnee

Wie aus Fig. 9 ersichtlich, zeigt dieser Schneetyp im sichtbaren Wellenlängenbereich sehr hohe Werte. Im nahen Infrarot fällt die Spektralkurve massiv ab. Einzig bei $1.8\ \mu\text{m}$ und $2.2\ \mu\text{m}$ sind noch zwei kleine Erhebungen in der Spektralkurve festzustellen.

2. Alternder Schnee

Der Schnee macht häufig einen "Alterungsprozess" durch, wobei er sich "setzt". Die Dichte des Schnees nimmt dabei zu, weil sich einerseits die Struktur der Schneekristalle von einer dendritischen Form zu einer kompakten Kugelform verändert, andererseits die mit Luft gefüllten Hohlräume zwischen den Schneekristallen verkleinert werden.

Der Verlauf der spektralen Kurve von alterndem Schnee ist stark abhängig von diesem Metamorphose-Prozess. Bleibt die Temperatur des Schnees immer unter dem Gefrierpunkt, so ist mit dem Alter eine mässige Abnahme der Reflexion vor allem im roten Bereich und im nahen Infrarot gegenüber frischem, lockerem Schnee festzustellen (Fig. 10). Stark abweichende Werte ergeben sich durch den Schmelz- und Wiedergefrier-Vorgang.

3. Schmelzender und wiedergefrorener Schnee

Die Laboruntersuchungen von O'BRIAN + MUNIS (1975) zeigten, dass schmelzender Schnee im roten Wellenlängenbereich und noch extremer im nahen Infrarot signifikant tiefere Reflexionswerte als trockener Schnee aufweist. Ausnahmen sind im Bereich von $1.5\ \mu\text{m}$ und noch ausgeprägter bei $1.9 - 2.0\ \mu\text{m}$ festzustellen, wo die Kurven von frischem, trockenem Schnee und schmelzendem Schnee zusammenfallen. Die Spektralkurve von wiedergefrorenem Schnee gleicht stark derjenigen von schmelzendem Schnee. Einzig bei $1.4\ \mu\text{m}$ und $2.2\ \mu\text{m}$ weichen die beiden Kurven voneinander ab, wobei ein Ansteigen des Reflexionsfaktors von wiedergefrorenem Schnee zu beobachten ist.

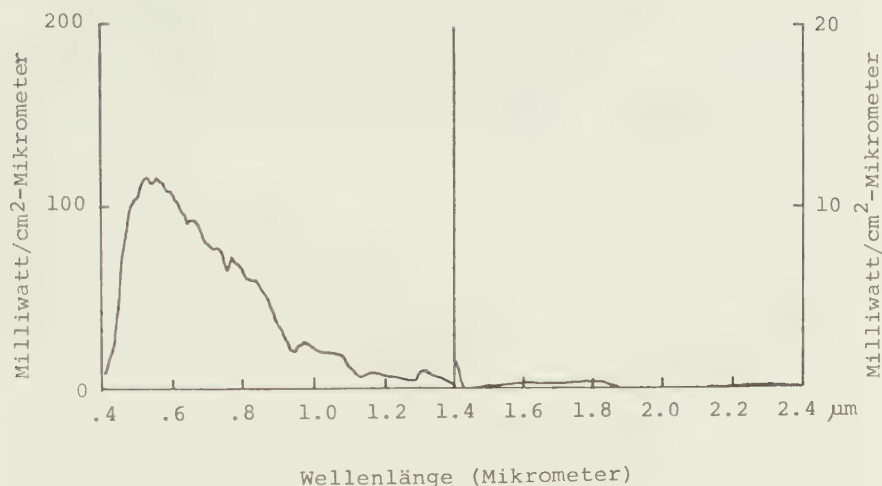


Fig. 9: Reflexionsverhalten von kaltem, trockenem Neuschnee (HOVIS, 1971, p. 16)

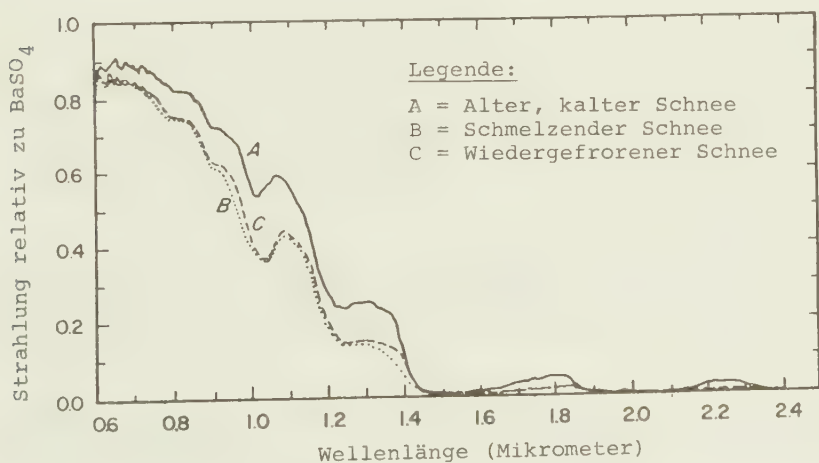


Fig. 10: Reflexionsverhalten verschiedener, im Labor untersuchter Schneetypen (O'BRIAN + MUNIS, 1975, p. 9)

4. Eiskrusten auf Schnee

Eiskrusten haben nach den Untersuchungen von O'BRIAN + MUNIS (1973) im sichtbaren Bereich einen sehr hohen Wert. Im Bereich von $1.0 - 1.4 \mu\text{m}$ ist eine Angleichung des spektralen Verhaltens von wiedergefrorenem Schnee feststellbar. Ueber $1.4 \mu\text{m}$ nimmt der Reflexionsfaktor kontinuierlich ab. Der Verlauf der Spektralkurve von Schnee, der mit einer Eiskruste überzogen ist, hat keine Ähnlichkeit mit den übrigen untersuchten Schneetypen.

Zusammenfassung

Aus den vorhandenen Daten können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Zwischen frischem, trockenem Schnee und feuchtem, schmelzendem Schnee besteht im Wellenlängenbereich von $1.1 - 1.4 \mu\text{m}$ ein signifikanter Unterschied, der es erlaubt, diese verschiedenen Schneetypen untereinander spektral zu trennen.
- Während der Schmelzperiode tritt sehr oft alternder, trockener Schnee neben feuchtem Schnee auf. Gegenüber dem frischen, trockenen Schnee nähert sich die Spektralkurve von alterndem Schnee im nahen Infrarot der Spektralkurve von feuchtem Schnee. Trotz dieser Annäherung der beiden Kurven reicht der Unterschied für eine spektrale Trennung der beiden Typen aber noch aus.

4.3 Reflexionsverhalten von Schnee in Schattenlage

Ein grosses Problem in der Fernerkundung sind die Reliefschatten, da dort die gleichen Objekte ganz andere Reflexionswerte aufweisen als in der Sonne. Die spektrale Unterscheidung verschiedener Objekte auch in Schattenlagen bedarf daher besonderer Untersuchungen.

Messungen (STAENZ, 1976) am Schnee im Schatten und in der Sonne ergaben ungefähr den gleichen Reflexionsfaktor, d.h. das Verhältnis von einstrahlender zu reflektierter Energie bleibt sowohl im Schatten als auch in der Sonne etwa gleich gross (Fig. 11, Kurve A).

Werden absolute Werte berücksichtigt, zeigt dagegen die reflektierte Strahlung (in mWcm^{-2}) im Gegensatz zum Reflexionsfaktor einen erheblichen Unterschied zwischen der in der Sonne und am Schatten gemessenen Fläche (Fig. 11, Kurve B)¹⁾.

1) Gemessen wurde mit dem Exotech-4-Kanal-Radiometer, dessen Messkanäle den Landsat-3-Kanälen entsprechen.

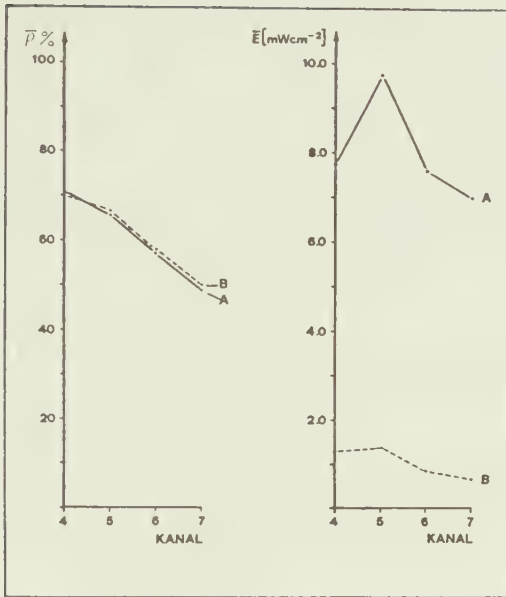


Fig. 11: Vergleich des gerichteten Reflexionsgrades (Mittelwert $\bar{p}$) und der reflektierten Strahlung (Mittelwert $\bar{E}$) von Bruchharsch an der Sonne (Kurve A) und im Schatten (Kurve B) (nach STAENZ, 1976, p. 148)

Dies ist auf die Globalstrahlung zurückzuführen, die im Schatten viel geringer ist als direkt an der Sonne. Um Kategorien auch in Schattenlage in einem automatisierten Auswerteverfahren richtig bestimmen zu können, sollten die Spektraldaten deshalb unbedingt standardisiert werden können (durch Berechnung des Reflexionsfaktors mit Hilfe der Globalstrahlung und der Spektraldaten).

Dazu benötigt man aber die Kenntnisse über die Einstrahlungsverteilungen im Schatten und in der Sonne. Zusätzlich müssen im Untersuchungsgebiet einige atmosphärische Parameter wie Transmission und Streulichte effekt gemessen werden.

Falls dies nicht möglich ist, kann gleichwohl, wenn auch unter schwierigeren Bedingungen, eine spektrale Differenzierung von Objekten im Schatten durchgeführt werden. (Für Objekte im Schatten müssen aber bei den "überwachten Verfahren" eigene Kategorien gebildet werden.) Sind zwei Objekte im sonnenbeschienenen Gelände spektral trennbar, so werden sie es auch nach Wegfall der direkten Sonnenstrahlung sein. Weil aber der Energiebetrag der reflektierten Strahlung im Schatten stark verringert ist, werden sich im Merkmalsraum die Abstände der Objekte zueinander entsprechend verkleinern (nach STAENZ, 1976). Diese Tatsache erfordert eine äusserst exakte Abgrenzung dieser speziellen Schnee-Schattenkategorien von den umgebenden schneefreien Kategorien (Kap. E.3.9).

4.4 Reflexionsverhalten von Wolken

Wolken, die über einem Untersuchungsgebiet liegen, können automatisierte Schneeflächenkartierungen stark verfälschen, weil sie ein ähnliches Reflexionsverhalten wie Schnee zeigen (Kap. 4.5). Es ist deshalb äusserst wichtig, auch genaue Kenntnisse über das spektrale Verhalten von Wolken zu haben. Grundsätzlich können zwei Typen von Wolken unterschieden werden:

- hochliegende Eiswolken
- tiefer als die Eiswolken liegende Wasserwolken

Leider sind auf unseren MSS-Aufnahmen nur die zu den Wasserwolken zählenden Cumulus-Wolken zu sehen, Eiswolken fehlen.

Der Reflexionsfaktor von Wasserwolken bleibt abgesehen von zwei einschneidenden Absorptionseinbrüchen bei 1.40 und 1.92 μm über alle MSS-Wellenlängenbereiche hoch (Fig. 12). Diese hohe Strahldichte bewirkt, dass in sieben MSS-Kanälen der Saturationswert 255 (Kap. 5) erreicht wird.

4.5 Strahldichtevergleich von Schnee und Wolken

Fig. 12 zeigt in einem Vergleich die Spektralkurven von Altschnee und Cumuluswolken. Beide Kurven liegen im sichtbaren Bereich so hoch, dass sie den maximal möglichen Skalenbereich der Scanner-Sensoren übersteigen (Saturation, Kap. 5) oder nahe an ihn herankommen. Eine Trennung von Wolken (Wasserwolken) und Schnee wird dadurch im Wellenlängenbereich von $0.41 - 0.88 \mu\text{m}$ verunmöglicht.

Erst im nahen Infrarot sind im Spektralverhalten von Schnee und Wolken Unterschiede feststellbar. Im Bereich von $1.6 \mu\text{m}$ und $2.1 \mu\text{m}$ stellen sich deutliche Abweichungen ein. Der Skylab-MSS konnte in diesen Wellenlängenbereichen Daten aufnehmen (Kanal 11 und 12). Die Untersuchung der Wertematrix in den betreffenden Kanälen ergab Unterschiede von etwa 150 Videowerten zwischen Wolken und Schnee, d.h. Schnee erscheint auf den Aufnahmen schwarz, während die Wolken weiss wiedergegeben werden. Das ergibt die Möglichkeit, diese zwei im visuellen Bereich weiss erscheinenden Kategorien gegeneinander abzugrenzen (Probleme ergaben sich nur am Rand von Wolken, Kap. E.3.9).

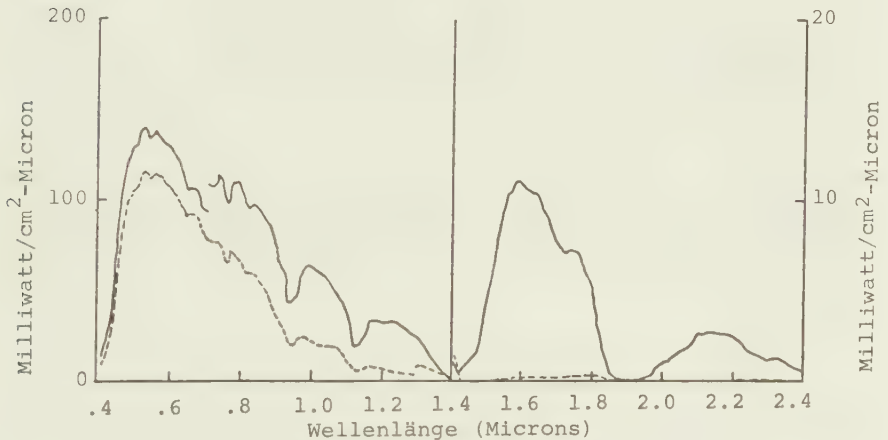


Fig. 12: Reflexionsverhalten von Altschnee und Cumuluswolken (HOVIS 1971, p. 16)

Legende:

- = Altschnee
- = Cumuluswolken

5. Problematik der Saturation

Beim Skylab- und beim Landsat-Scanner tritt in den Kanälen des visuellen Bereiches ein Problem auf, das die Untersuchung von Schnee und Wolken behindern kann. Der extrem hohe Strahldichtewert von Schnee kann den maximal möglichen Skalenbereich der betreffenden Sensoren übersteigen. Deshalb bleibt der eigentliche Strahldichtewert von Schnee (die Wolken haben die gleichen Eigenschaften) in diesen Wellenlängenbereichen unbekannt, weil der Scanner in solchen Fällen nur den für ihn höchst möglichen Wert anzeigen kann (Saturationseffekt, Fig. 13). Die Nachteile, die sich daraus ergeben, liegen auf der Hand. Flächen, die eigentlich von der Strahldichte her noch trennbar wären, fallen zusammen. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Klassifikationsverfahren entstanden bei der Bearbeitung solcher "homogener" Flächen entsprechend statistische Probleme (Kap. E.4.2).

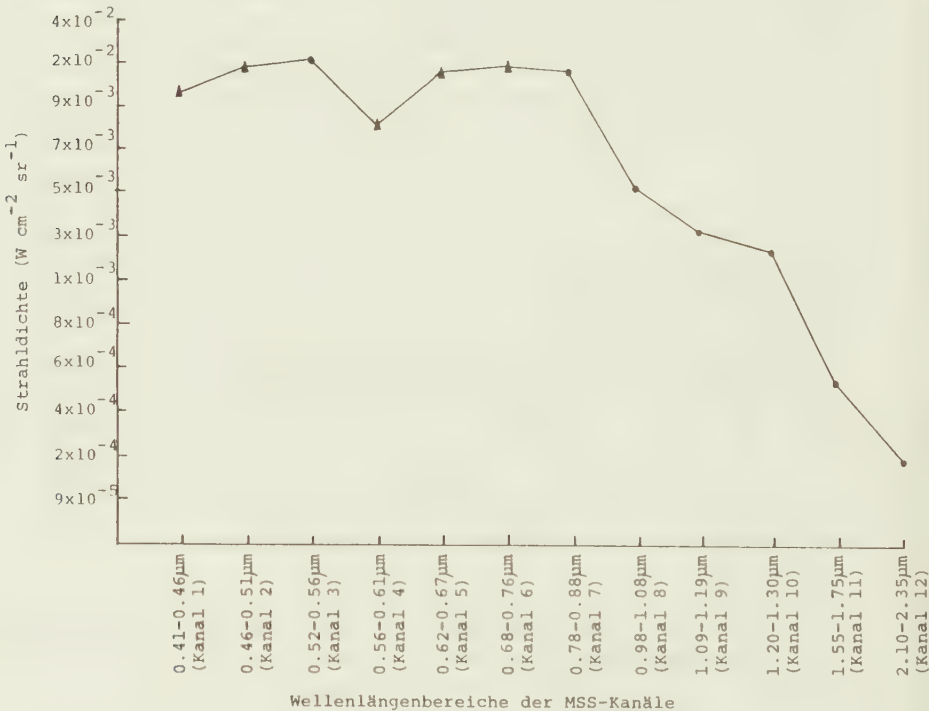


Fig. 13: Strahldichte von Schnee in zwölf MSS-Kanälen an einem Beispiel im Wasatch Testgebiet (USA). Die Dreiecke bezeichnen die saturierten Werte (nach BARNES, 1975, p. 60).

6. Verwendete Computer und Hilfsgeräte

Um multispektrale Klassifikationsverfahren automatisieren zu können, müssen Rechenanlagen mit grosser Leistung zur Verfügung stehen. Die nachfolgend aufgezählten Anlagen ermöglichten die Durchführung dieser Arbeit.

1. Computer

IBM 370/155: Zu Beginn dieser Arbeit wurde mit dem alten Computer des Rechenzentrums der Universität Zürich gearbeitet (bis Ende 1978).

IBM 3033: Anfangs 1979 schaffte das Rechenzentrum der Universität Zürich einen neuen Grosscomputer an, dessen Leistung etwa das Achtfache (bezogen auf die Zentraleinheit) des alten IBM 370/155 beträgt. Die Software des neuen Computers erlaubt es, Programme, die auf dem alten System erarbeitet wurden, ohne grosse Änderungen zu übernehmen. Dadurch konnte die Arbeit auch in der Uebergangsphase ohne grosse Verzögerung fortgesetzt werden.

Das Geographische Institut der Universität Zürich ist mit zwei Terminals an die Rechanlage angeschlossen, wobei ein interaktives Arbeiten mit Time Sharing Option (TSO) möglich ist.

CDC 6500/6400: Die Grossrechner der ETH Zürich erlauben es, dank grosser Speicherkapazität und Rechenleistung relativ rasch und rationell vorzugehen. Der Nachteil dieses Systems liegt darin, dass nicht interaktiv gearbeitet werden kann.

2. Aufbelichtungssysteme

Photomation Optronics P 1700: Für die bildhafte Wiedergabe der Klassifikationsergebnisse wurde ein Aufbelichtungssystem benötigt, das eine kartographisch exakte Darstellung erlaubt. Für diese Zwecke stellte uns das Institut für Kommunikationstechnik der ETH Zürich ein Gerät zur Verfügung, das in die Klasse der off-line-Bildverarbeitungsgeräte gehört und durch die Verwendung eines Prozessrechners eine gewisse Flexibilität erhält. Das Photomation-System erlaubt:

- transparente, photographische Vorlagen abzutasten und zu digitalisieren. Die Information wird dabei auf einem Magnetband gespeichert.
- Digitalinformationen von einem Magnetband auf photographischen Film aufzubelichten und bildhaft darzustellen.

Neben diesen beiden Hauptoptionen kann man mit dem Prozessrechner weitere Operationen durchführen, die das Kennenlernen der Bildinformation und die Benützung des Systems erleichtern.

C. PHYSISCH-GEOGRAPHISCHE CHARAKTERISIERUNG DES UNTERSUCHUNGS- GEBIETES

1. Das Untersuchungsgebiet

Bevor das Untersuchungsgebiet festgelegt werden konnte, mussten vorgängig die Kriterien aufgestellt werden, nach denen das Gebiet ausgewählt werden sollte.

Um der Zielsetzung dieser Arbeit gerecht zu werden, musste in erster Priorität eine Region ausgesucht werden, in der, grossräumig verteilt, Schneeflächen liegen.

Weiter musste darauf geschaut werden, dass grosse Schwankungen der Strahlungswerte infolge störender, atmosphärischer Einflüsse vermieden werden konnten. Werden nämlich keine atmosphärischen Korrekturen durchgeführt, sollten grossflächige Zonen nur bei relativ stabilen Wetterverhältnissen klassiert werden, weil sonst die Abweichungen der Strahldichte einer Kategorie allzu stark sein könnten.

Um die Klassifikationsergebnisse qualitativ überprüfen zu können, müssen aus dem Untersuchungsgebiet Luftaufnahmen und andere Informationen existieren.

Auf Grund der oben erwähnten Kriterien wurde schliesslich die Region südliche Walliser Hochalpen - Mt. Blanc-Massiv als Untersuchungsgebiet ausgewählt (Abb. 1). Das Gebiet hat eine Fläche von 7'773 km², was auf den MSS-Bildern 1'025 Kolonnen x 1'560 Linien, total als 1'599'000 Pixel ergibt (entspricht in Fig. 7 Aufnahme 1). Die Skylab-Aufnahmen wurden im Herbst gemacht. In dieser Jahreszeit liegt die Schneegrenze normalerweise am höchsten. Teile des Untersuchungsgebietes reichen in die Zone, in der das ganze Jahr Schnee liegt. Auf die Problematik der Schneeverhältnisse solcher Zonen wird in Kap. D.3.9 eingegangen.

2. Das Testgebiet

Die Durchführung der zahlreichen Versuchsreihen (Kap.E.4-E.6) kann aus operativen Gründen (Umfang des Datenmaterials) unmöglich im ganzen Untersuchungsgebiet vorgenommen werden. Gemäss Konzept (Kap. E.2) muss deshalb innerhalb des Untersuchungsgebietes eine kleine Fläche, das Testgebiet, ausgewählt werden, in der dann hauptsächlich gearbeitet wird.

Da sich das Untersuchungsgebiet über ein grosses Gebiet erstreckt, kommen neben Hochgebirgs- auch ausgedehnte Tallagen vor.

Um auch im Testgebiet eine repräsentative Klassifikation vornehmen zu können, müssen dort so viele Landschaftselemente wie möglich vorhanden sein. Nur so kann anschliessend in anderen Vergleichsregionen ohne neue Stichprobenselektion gearbeitet werden. Daneben sollten diese Landschaftselemente relativ grossflächig auftreten, damit eine klare Abgrenzung der Stichproben gewährleistet ist.

Diese Forderung erfüllt das Gebiet Mischabel-Gornergletscher am besten. Zudem stammen die Vergleichsaufnahmen des Militärflugdienstes vom 7.9.1973 grösstenteils aus diesem Gebiet, und die Skylab-Photographien sind auf diesem schmalen Gebietsstreifen stereoskopisch betrachtbar. Darum wurde diese Zone als Testgebiet ausgewählt (Fig. 14). Sie hat eine Fläche von 161.2 km², was auf den MSS-Bildern 216 Kolonnen x 160 Linien, total also 34'560 Pixeln entspricht.

3. Erweitertes Testgebiet

Die im Testgebiet festgelegten Klassifikationsparameter müssen in einem Zwischenschritt in einem grösseren Gebiet überprüft werden. Für diesen Zweck wurde das Mattertal mit den umliegenden Bergzügen ausgesucht (siehe Abb. 1). Das Gebiet umfasst im MSS-Bild 540 Linien und 488 Kolonnen, was gesamthaft 263'520 Pixel ergibt. Dies entspricht einer Fläche von 1'281 km².



Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet (MSS-Aufnahme 1, Wellenlängenbereich 0.78-0.88 μm), Massstab $\approx 1:1'000'000$

4. Wetterlage

Die Wetterverhältnisse waren am 11.9.1973 um 13 Uhr nur im Wallis relativ günstig. Die Alpennordseite und grosse Teile des Kantons Graubünden waren wolkenbedeckt. Um die Situation im Untersuchungsgebiet genau charakterisieren zu können, wurde uns freundlicherweise von der SMA¹⁾ ein Bericht über die Wetterverhältnisse für die Region des Testgebietes übermittelt:

- Es herrschte während des ganzen Septembers im Wallis eine Schönwetterlage vor.
- Im Testgebiet fielen seit dem 26.8.1973 keine Niederschläge mehr.
- Die Null-Grad-Grenze stieg in dieser Zeit-Periode vorübergehend bis 3'700 m.
- Die Null-Grad-Grenze lag am 11.9.1973 1300 Uhr auf 3'300 m über Meer.
- Die Temperatur in Saas-Almagell (1'675 m) betrug 16.4° C.
- Südlich des Mt.Rosa trat eine lockere Cumulus-Schicht auf.

Aus diesen Angaben kann gefolgert werden, dass während des Ueberfluges im Testgebiet kein Neuschnee vorhanden war, und dass in der Region unter 3'300 m der Schnee zu dieser Tageszeit feucht sein musste.

5. Bodenkontrolle

Im Zeitpunkt der Aufnahme konnten leider keine Bodenbegehungen vorgenommen werden, da wir erst nachträglich vom Ueberflug in Kenntnis gesetzt wurden. Die Arbeit mit den Skylab-Daten wurde erst zwei Jahre nach dem Ueberflug aufgenommen.

Da aber ausgezeichnete, stereoskopische Luftaufnahmen existieren, lassen sich durch analoge Photointerpretation Rückschlüsse auf bestimmte Landschaftselemente ziehen (Kap. E.9).

1) SMA = Schweizerische Meteorologische Anstalt

6. Flugaufnahmen

Zufälligerweise wurden am 7.9.1973 im Mt. Rosa-Massiv im Auftrag des Geographischen Instituts der ETH Zürich vom Militärflugdienst Aufnahmen gemacht, die auch uns zur Verfügung gestellt wurden. Die Luftbilder liefern dank stereoskopischer Betrachtungsmöglichkeit und guter Auflösung wertvolle Bodeninformationen. Die Aufnahmen können wie folgt charakterisiert werden:

- Bildtyp: senkrecht und z.T. schräg
- Filmtyp: panchromatisch
- Kamera: K-24, $f = 178$ mm
- Flughöhe: 8'500 m über Meer
- Massstab: ca. 1:30'000

D. METHODEN ZUR KLASSIFIKATION VON FERNERKUNDUNGSDATEN

1. Klassifikationsverfahren

Grundsätzlich setzt das Zuordnen von Pixels zu einer Klasse ein Entscheidungskriterium voraus, aufgrund dessen die Pixel klassiert werden (nach LANGREBE, 1972). Dabei gibt es zwei verschiedene methodische Verfahrensgruppen, um das vorhandene Datenmaterial zu klassieren:

1. Ueberwachte Verfahren (supervised classsification techniques)

Es werden Art und Zahl der zu unterschiedenen Klassen a priori vorgegeben (Stichproben durch Bodenkontrolle, Reflexionsmessungen am Boden etc.) und jedes Pixel der ähnlichsten Klasse (in der Literatur auch Lerngruppe genannt) zugeordnet (nach WEBER, 1967).

2. Gruppierungsanalyse (unsupervised classification oder clustering techniques)

Mittels statistischer Methoden wird die gesamte Datenmenge aufgrund der ihr innewohnenden Strukturen in zusammengehörige Klassen (clusters) gruppiert und deren Grenzwerte bestimmt, in der Annahme, dass einheitliche Klassen einem bestimmten Oberflächenelement entsprechen (nach BOCK, 1970).

Bei der ersten Verfahrensgruppe beruht die Qualität der Klassifikation darauf, wie gut die Kategorien festgelegt und wie eindeutig und allgemeingültig die eingegebenen Stichprobenwerte bestimmt werden können (BINZEGGER, 1975).

Bei den Gruppierungsverfahren liegt die Problematik in der richtigen Zuordnung der ermittelten Gruppen zu realen Objekten und bei der genauen Festlegung ihrer Grenzwerte. Daneben stellt sich, sofern nicht eine gewünschte Gruppenzahl vorgegeben ist, die Frage, wann der iterative Prozess der Generalisierung abgebrochen werden soll, d.h., wann die optimale Gruppenzahl erreicht ist. Die mathematischen Grundlagen zur Lösung dieses Problems sind bei STEINER nachzulesen.

Die Eigenheiten der beiden oben beschriebenen Verfahrensgruppen werden nun im folgenden dargelegt, da beide im Laufe der Arbeit angewendet werden.

1.1 Ueberwachte Methoden

Bei den Methoden der "überwachten Verfahren" müssen in einem ersten Schritt die Grundgesamtheiten (d.h. in unserem Fall die wichtigsten Oberflächeneinheiten = Kategorien) bestimmt und die dazugehörigen Stichproben lokalisiert und analysiert werden.

In einem zweiten Schritt werden mit Hilfe eines Klassifikationsalgorithmus alle vorhandenen Bildelemente einer der im ersten Schritt bestimmten Grundgesamtheiten zugeordnet. Diese Zuordnung (Klassifikation) erfolgt durch Erfassen einer Anzahl von Merkmalen (Spektralbereich der MSS-Kanäle) an jedem fraglichen Bildelement.

Anwendbare mathematische Methoden solcher Klassifikationsverfahren finden sich im Bereich der Diskriminanzanalyse. In der Literatur über Fernerkundung wird der Begriff Diskriminanzanalyse im weitesten Sinne für alle Verfahren verwendet, die aufgrund vorgegebener Kategorien eine Klassifikation von Daten vornehmen (WEBER, 1967). Bezüglich ihrer mathematischen Annahmen können die Diskriminanzanalysen wie folgt unterschieden werden:

1. Deterministische Diskriminanzanalyse

Hier werden die empirisch gefundenen Distanzen zu den Gruppenmittelpunkten als Basis zur Berechnung der Trennfunktion verwendet. In dieser Arbeit wird als Vertreter dieser Gruppe ein Euklid'scher Minimum-Distanz-Algorithmus getestet (Programmname: DCLAS).

2. Statistische Diskriminanzanalysen

Sie beruhen auf Wahrscheinlichkeitsmodellen. Die Verfahren lassen sich noch weiter in parametrische und nichtparametrische Methoden unterteilen. Bei der parametrischen Methode wird die Trennfunktion der Gruppen durch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen definiert, die mit Hilfe von Parametern berechnet werden können.

Bei linearen Klassifikationsfunktionen sind zur Trennung von Kategorien Normalverteilung der Daten und gleiche Varianzen und Kovarianzen erforderlich. In anderen Fällen müssten quadratische Trennfunktionen angewandt werden (WALTER, 1970).

Als Vertreter der parametrischen Methode verwenden wir einen "Maximum-Likelihood"-Algorithmus (maximale Mutmasslichkeit) (Programmname: MCLAS) aus der IBIS-Programmbibliothek (Kap. 1.1.2).

Bei den nichtparametrischen Methoden werden keine konventionellen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen benutzt. Die Wahrscheinlichkeitsdichte muss geschätzt werden. Diese Verfahren werden in unserer Schneeuntersuchung aus operativen Gründen nicht angewendet.

1.1.1 Deterministische Klassifikationen

Die theoretischen Erläuterungen dieser Art von Klassifikationsverfahren werden bei NUESCH (1977) eingehend behandelt. Deshalb wird in dieser Arbeit nur kurz auf die Grundlagen dieser Algorithmen eingegangen.

Das deterministische Klassifikationsverfahren, das in dieser Untersuchung gebraucht wird (DCLAS), arbeitet mit linearen Trennfunktionen nach der Formel:

$$g_1(x) = a_{01} + a_{11}x$$

a = Parameter, die eingegeben werden müssen, z.B.
Mittelwert, Standardabweichung etc.

Das Trennkriterium wird durch Distanzmasse errechnet. Genauer gesagt sind es die Euklid'schen Distanzen zwischen einem zu klassierenden Element und den Kategorienmittelpunkten, die eine bestimmte Zuteilung bewirken. Ein Bildelement wird derjenigen Kategorie zugeordnet, zu deren Mittelpunkt es die kleinste Distanz aufweist.

1.1.2 MCLAS-Algorithmus

Eine ausführliche Beschreibung dieses Klassifikators findet sich bei NUESCH (1977) und bei FASLER (1979).

Der MCLAS-Algorithmus als Vertreter der statistischen Klassifikationstechniken verwendet zur Beschreibung der einzelnen Kategorien mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Damit wird unter Annahme einer Normalverteilung der Daten die Mutmasslichkeit der Klassenzugehörigkeit eines Elementes bestimmt. Bei diesem Verfahren ("Maximum Likelihood"-Methode) müssen die Parameter wie Mittelwerte und Kovarianzen der Kategorien aus der statistischen Analyse berechnet werden.

Der MCLAS-Klassifikator aus der IBIS-Programmbibliothek (Kap. E.1.6) unterscheidet sich von anderen "Maximum Likelihood"-Methoden dadurch, dass eine implementierte Hauptkomponentenanalyse für jede Kategorie einen individuellen Entscheidungsraum berechnet. Der ursprünglich aufgespannte Messraum dieser Kategorie, dessen Dimension durch die Anzahl der verwendeten Kanäle gegeben ist, wird durch Translation und Rotation so geändert, dass ein neuer Entscheidungsraum entsteht. Die Lage der ersten Hauptachse im neuen Koordinatensystem ist durch ein Maximum an Varianz bedingt. Die zweite Hauptachse liegt orthogonal auf der ersten und geht durch den Schwerpunkt des Systems. Die dritte Hauptachse ist im dreidimensionalen Fall die Senkrechte zur ersten und zweiten Hauptachse und geht ebenfalls durch den Schwerpunkt.

Die Länge der Hauptachsen ist proportional zur Grösse der Varianz in der Richtung der jeweiligen Hauptachse. Der Varianzanteil nimmt dabei gegenüber den in der Rangfolge weiter vorne liegenden Hauptachsen beständig ab.

Die Verwendung der Hauptkomponentenanalyse hat gezeigt, dass der grösste Teil der Varianz (Information) durch eine begrenzte Anzahl von Hauptachsen dargestellt werden kann. Dadurch hat man eine geeignete Methode zur Datenreduktion gefunden, ohne dabei eine Abnahme der Klassierungsgenauigkeit in Kauf nehmen zu müssen.

Versuche von der BENDIX AEROSPACE SYSTEMS DIV., 1974, zeigten, dass bei konventionellen "Maximum Likelihood"-Klassifikationsverfahren eine signifikante Verschlechterung der Klassifikationsergebnisse eintritt, wenn mehr als vier Variablen in die Berechnung einbezogen werden. Der Grund liegt darin, dass bei Verwendung einer grösseren Anzahl Variablen (entspricht in dieser Arbeit den MSS-Kanälen) bei den in der Rangordnung letzten Hauptachsen relativ häufig Eigenwerte entstehen, die kleiner als 1 sind. In diesen Fällen liegen die Wahrscheinlichkeitsdichtekurven der Lerngruppen so dicht beieinander, dass eine richtige Zuordnung von Untersuchungselementen zufällig wird.

Beim MCLAS-Programm werden deshalb Hauptachsen, deren Eigenwerte kleiner als 1 sind, gestrichen. Damit wird der negative Einfluss, den solche Achsen ausüben, eliminiert. Das MCLAS-Programm bietet die Möglichkeit (Fig. 15), eine grössere Anzahl als fünf Ausgangsvariablen in das Klassifikationsverfahren einzubeziehen. Da der MCLAS-Klassifikator für jede einzelne Kategorie einen eigenen Entscheidungsraum berechnet, ist es wahrscheinlich, dass jede Untersuchungskategorie auch eine andere Variablenkombination (Kanäle) als Ursprung zur Berechnung dieses Entscheidungsraumes benutzt. Darum kann man mit diesem Algorithmus das Ergebnis einer Klassifikation kontinuierlich verbessern, je mehr Variablen man in das Verfahren einbezieht.

Diese Tatsache liefert die Voraussetzung, dass alle zwölf zur Verfügung stehenden Spektralkanäle in unserer Untersuchung verwendet werden können.

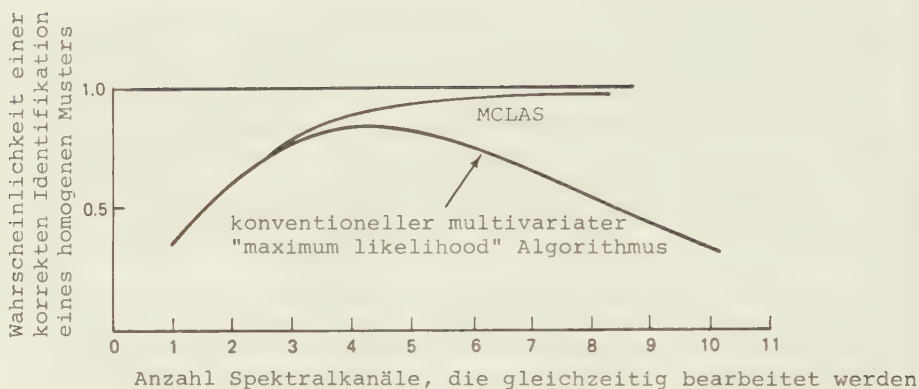


Fig. 15: Qualitätsvergleich MCLAS - konventionelle "Maximum Likelihood"-Algorithmen bezogen auf die Anzahl verwendeter Kanäle (nach BENDIX AEROSPACE SYSTEMS DIV., 1974)

1.2 Unüberwachte Methoden

1.2.1 Theoretische Erläuterungen zur Gruppierungsanalyse

Die nachfolgende Beschreibung stützt sich auf die Ausführungen von STEINER.

Im Gegensatz zu den im Kap. 1.1 beschriebenen überwachten Verfahren, werden bei den "nicht überwachten" Klassifikationstechniken keine Lerngruppen vorausgesetzt. Die Gruppierungsanalyse (Cluster Analysis) ist eine multivariate, statistische Methode zur Klassifizierung von Beobachtungen. Ziel ist eine Prüfung von Elementen auf Gemeinsamkeiten hin und eine auf diesen Erkenntnissen beruhende Einteilung dieser Elemente in homogene Gruppen (Cluster). Zwischen zwei solchen Gruppen sollen auffallende Unterschiede bestehen.

Bei der Gruppierungsanalyse von MSS-Daten geht es darum, eine Unterteilung einer Menge von Pixeln zu erhalten, die einer gewünschten Unterteilung von Kategorien entspricht. Voraussetzung dazu ist die Definition eines Ähnlichkeitsmasses der Pixel. Als einfachstes Ähnlichkeitsmass bietet sich die Distanz zwischen den Pixeln im m -dimensionalen Variablenraum an. Als weitere Ähnlichkeitsmasse können auch Korrelationen und Winkelmasse herangezogen werden. Auf diese Cluster-Typen wird im weiteren aber nicht eingegangen.

1.2.2 Distanzmethoden

Hier wird als Aehnlichkeitsmass die Euklid'sche Distanz d_{jk} zwischen zwei Punkten x_j, x_k verwendet, wobei:

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_{ik})^2}$$

$$x_j = \begin{bmatrix} x_{1j} \\ \vdots \\ x_{mj} \end{bmatrix} \quad x_k = \begin{bmatrix} x_{1k} \\ \vdots \\ x_{mk} \end{bmatrix}$$

Ein Beispiel innerhalb der Distanzmethoden ist die Zentroid-methode. Als Aehnlichkeitskriterium wird die kleinste Distanz zwischen zwei Gruppenzentren gebraucht.

In einer Matrix D_n^2 (quadrierte Distanzen) wird der kleinste Wert d_{jk}^2 gesucht. Sodann fasst man die zwei zugehörigen Punkte zusammen und repräsentiert diese Gruppe durch ihr Zentrum $x_{j/k}$:

$$x_{j/k} = \begin{bmatrix} x_{1j/k} \\ \vdots \\ x_{mj/k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{1j} + x_{1k}}{2} \\ \vdots \\ \frac{x_{mj} + x_{mk}}{2} \end{bmatrix}$$

Die Koordinate des Zentrums ist das arithmetische Mittel der gegebenen Koordinaten. Die Originalpunkte x_j, x_k werden weiterhin nicht mehr betrachtet.

Nun sind sämtliche quadrierten Distanzen zwischen diesem Zentrum und den übrigen $n - 2$ Punkten x_i zu berechnen:

$$d_{i j/k}^2 = \sum_{p=1}^m (x_{pi} - x_{pj/k})^2 \quad (i=1\dots n, \quad i \neq j,k)$$

Die j. und k. Spalte und Zeile werden anschliessend in der D_n^2 -Matrix gestrichen und durch eine einzige Zeile und Spalte mit den Werten $d_{i j/k}^2$ ersetzt. Durch die Reduktion ist eine neue D_{n-1}^2 -Matrix entstanden. Im nächsten Schritt wird in dieser Matrix der kleinste Wert gesucht und wie oben fortgefahren.

Im Laufe der Berechnung werden also die originalen Punkte mehr und mehr zu Gruppen zusammengefasst und durch deren Zentren repräsentiert; dabei wird auch ein Gruppenzentrum bei Hinzunahme eines neuen Punktes zu dieser Gruppe wieder "vergessen" und durch ein neues Zentrum ersetzt. Ein neu hinzugenommener Punkt kann dabei selber bereits Zentrum einer anderen Gruppe sein, so dass bei der Berechnung der Koordinaten eines neu zu bildenden Zentrums ganz allgemein eine gewichtete Mittelwertbildung verwendet werden muss.

Solche Gruppierungsverfahren, die eine vollständige Distanzmatrix von allen Pixeln berechnen, sind extrem rechenzeitintensiv und haben mit zunehmender Datenmenge einen enormen Kostenanstieg zur Folge. An eine wirtschaftliche Verwendung kann man gar nicht denken.

Damit Clusteranalysen aber auch in der Fernerkundung mit grossen Datenmengen angewendet werden können, entwickelte die Pennsylvania State University (ORSER, 1973) ein Gruppierungsverfahren (Programmname: CLUS), das zur Verwendung eines grossen Datensatzes geeignet ist. Im folgenden Kapitel werden die Eigenheiten des CLUS-Programmes dargelegt, da es in dieser Arbeit benutzt wurde.

1.2.3 Das CLUS-Programm

CLUS (ORSER, 1973) weicht aus den im vorigen Kapitel dargelegten Gründen von der im Kap. 1.2.2 beschriebenen, kostenintensiven Zentroid-Methode ab. Es wird vor allem auf die Berechnung der vollständigen Distanzmatrix verzichtet. Die Gesamtmenge aller Elemente wird am Anfang zur Berechnung der Zentren unterteilt. Zusätzlich verwendet man bei CLUS einen Algorithmus, der jedes in die Analyse einbezogene Element nur einmal prüft ("Single Pass Algorithm") und dadurch besonders kostensparend ist.

CLUS-Optionen: Die ersten Gruppen-Zentren werden anhand der Bildelemente der ersten Linie des eingegebenen Datenblocks berechnet. Der Benutzer gibt vorgängig eine "kritische Distanz" d_c^2 ein.

Wenn der quadrierte Abstand d^2 der Vektoren der beiden ersten Bildelemente x_j und x_k der ersten Linie kleiner als d_c^2 ist, wird das erste Zentrum C_1 mit einem neuen Mittelwert $x_{j/k}$ gebildet. Wenn $d^2 > d_c^2$, dann wird aus $x_j = C_1$ und aus $x_k = C_2$.

Anschliessend wird das dritte Pixel der ersten Linie in die Berechnung einbezogen. Es wird demjenigen Cluster zugeordnet, zu dem die Distanz am kleinsten ist. Wenn die Distanz grösser ist als d_c^2 , bildet das dritte Pixel ein neues Zentrum. Bei allen Bildelementen der ersten Linie wird dieser Vorgang wiederholt.

Sobald ein neues Pixel einem gegebenen Zentrum zugeordnet wird, berechnet der Computer die neuen Mittelwerte und Standardabweichungen dieses Clusters.

Die Zahl der Cluster, die aus der ersten Linie stammen, kann so beeinflusst werden, dass mit einer grossen "kritischen Distanz" eine kleine Anzahl von Zentren entsteht.

Nachdem das Programm die ersten Cluster aus der ersten Linie des Datenblocks berechnet hat, werden innerhalb des spezifizierten Datenblocks, nach dem Zufallsprinzip, eine Anzahl von "Probe-Punkten" bestimmt, die den Umfang der Cluster noch erweitern sollen. Die Anzahl dieser Punkte kann der Benutzer angeben.

Jeder "Probe-Punkt" wird mit den Ursprungs-Clustern verglichen und wieder nach dem Minimal-Distanz-Verfahren zugeordnet. Das Abgrenzungskriterium, ob ein Punkt einem schon vorhandenen Cluster zugeordnet wird oder selbst ein neues Zentrum bildet, kann wiederum der Benutzer bestimmen. Er muss als Grenze ein bestimmtes Vielfaches der Cluster-Standardabweichungen eingeben.

Liegt z.B. ein Probe-Punkt weiter als drei Standardabweichungen (vom Benutzer eingegeben) vom nächsten Cluster entfernt, bildet dieser Punkt selber ein neues Zentrum.

Nachdem alle "Probe-Punkte" zugeordnet wurden, werden diejenigen Cluster, die nur aus einem Punkt bestehen, wieder eliminiert, weil sie bei der anschliessenden Klassifikation des Datenblocks mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen signifikanten Beitrag liefern könnten.

In einem abschliessenden Verfahren werden nun alle Bildelemente des Datenblocks wieder nach dem Minimal-Distanz-Verfahren einem in der Vorverarbeitung berechneten Cluster zugeordnet.

E. DATENVERARBEITUNG

1. Einleitung

Für die operationelle grossflächige Schneeflächenkartierung sind Verfahren zu finden, die exakte Resultate liefern und dennoch kostengünstig sind.

Die Computer-Rechenzeit, die für eine Klassifikation aufgewendet werden muss, kann vom Benützer, dem eine vorhandene Programm-bibliothek zur Verfügung steht, durch die drei folgenden Punkte beeinflusst werden, wobei die Rangfolge den Grad der Beeinflussung wiedergibt:

1. Klassifikationsalgorithmus
2. Kanalzahl
3. Kategorienzahl

Es muss also einerseits ein Klassifikationsalgorithmus gefunden werden, der einfach aufgebaut ist und dadurch schnell arbeiten kann, gleichwohl aber genaue Ergebnisse liefert. Andererseits muss die Anzahl der Kanäle und Kategorien bis an die Toleranzgrenze verringert werden, bei der das Klassifikationsergebnis den geforderten Qualitätsansprüchen gerade noch genügt.

2. Methodisches Vorgehen

Zur Erreichung der in Kap. A.1 gesetzten Ziele wurde der Datenverarbeitungsablauf in die folgenden, chronologisch gegliederten Schritte aufgeteilt:

1. Festlegung der im Untersuchungsgebiet auftretenden Oberflächeneinheiten (Landschaftselemente und Wolken) für die Kategorienbildung bei den überwachten Verfahren.
2. Auswahl der Stichproben für jede Kategorie im Untersuchungsgebiet.
3. Statistische Analyse der Stichproben und Kategorien (Kap. 3.1) mit allen verfügbaren Kanälen.
4. Klassifikation mit verschiedenen Algorithmen unter Berücksichtigung aller verfügbarer Kanäle und festgelegter Kategorien. Damit wird für jeden Algorithmus eine "optimale" Klassifikation hergestellt. Sie ermöglicht eine fundierte Aussage über die Qualität einer Schneeflächen-Klassifikation aller zur Verfügung stehenden Mitteln.

5. Selektion der Kanäle nach der Reihenfolge, in der sie die vorhandenen Kategorien am besten zu trennen vermögen.
6. Systematische Reduktion der Kanäle mit allen Kategorien bis zur Toleranzgrenze (starker Abfall der Klassifikationsgenauigkeit).
7. Reduktion der Kategorien mit den im Kanalselektionsverfahren bestimmten Kanälen. Da für eine Schneeflächenbestimmung effektiv nur die "Schneekategorien" interessieren, sollen die "schneefreien" Kategorien, soweit sie für die Abgrenzung der Schneefläche nicht relevant sind, zusammengefasst oder eliminiert werden. Bei der Schlussklassifikation werden sich aus diesem Grunde nur noch die Schneekategorien klar definieren und flächenmässig bestimmen lassen. Alle anderen Kategorien werden zur "schneefreien Zone" zusammengefasst.
8. Wiederholung des Selektionsverfahrens der Kanäle mit reduzierter Kategorienzahl. Allfällige Aenderungen müssten in Vergleichsklassifikationen getestet und angepasst werden.
9. Klassifikationen der Schneefläche mit reduzierter Kanal- und Kategorienzahl im Testgebiet.
10. Ueberprüfung der Klassifikationsergebnisse durch einen quantitativen und räumlichen Vergleich mit der "Bodenkarte" (Kap. E.1).
11. Ueberprüfung der im Testgebiet festgelegten Klassifikationsparameter in einem erweiterten Testgebiet.
12. Klassifikationen mit reduzierter Kategorien- und Kanalzahl im Untersuchungsgebiet.

Prinzipielles

Diese Arbeit unterscheidet sich im methodischen Vorgehen gegenüber anderen Untersuchungen in einem wichtigen Punkt. Bei den bisherigen Arbeiten wurden alle im Testgebiet vorkommenden Kategorien eindeutig definiert und auch als solche klassiert. Bei Projekten, die eine ganz klar abgegrenzte Aufgabenstellung haben (Klassifikation nur eines bestimmten Untersuchungsobjektes) trägt aber nur ein Teil dieser Kategorien zur Genauigkeit des Untersuchungsergebnisses bei. Aus diesem Grunde sollte es möglich sein, durch Eliminieren von irrelevantem Informationsmaterial in entscheidendem Masse Rechenzeit einsparen zu können.

3. Bestimmung der Kategorien und Stichproben

3.1 Definitionen

Da in der Literatur über Bildinterpretation keine einheitliche Terminologie besteht, sollen an dieser Stelle die für diese Arbeit wesentlichen Begriffe definiert werden.

Hauptkategorien

Hauptkategorien stellen eine willkürliche, künstliche Zusammenfassung von Kategorien dar, die durch die Zielsetzung einer Untersuchung bestimmt sind.

So können z.B. die Kategorien Gras, Wald, Rasen, Felsen, Fluss, Siedlung, Schotterzone etc. zu der übergeordneten Hauptkategorie "schneefreie Zone" zusammengefasst werden. In dieser Arbeit werden auf Grund der Aufgabenstellung (Kap. A.2) die beiden Hauptkategorien "Schnee" und "schneefreie Zone" gebildet.

Kategorie

Eine Kategorie stellt eine auf statistischer Basis durchgeführte Zusammenfassung von gleichen, aber lokal getrennten Oberflächeneinheiten (Landschaftselemente, Wolken) dar. Die Statistik der Kategorien umfasst u.a. einen gewogenen Mittelwert und die Streuung der durch die verschiedenen Dispositionen der Oberflächeneinheiten erhaltenen Werte (unterschiedliche Höhenlage, Hangneigung, Exposition etc.).

Beispiel: Im Untersuchungsgebiet darf nicht einfach eine ganz bestimmte Schneefläche als statistische Grundlage ausgewählt werden, da es an vielen Orten Schneeflächen mit sehr unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften hat. Entsprechend müssen verschiedene Schnee-Kategorien (siehe Tab. 3) gebildet werden.

Einzelne, stark streuende Kategorien können eine bimodale Häufigkeitsverteilung aufweisen. Damit die Voraussetzungen für eine Klassifikation (Normalverteilung) gegeben sind, müssen solche Kategorien jeweils noch in zwei Unter-Kategorien aufgeteilt werden.

Stichprobe

Darunter wird ein eindeutig identifizierbares, mehr oder weniger in sich abgeschlossenes und homogenes Landschaftselement verstanden, z.B. ein Waldstück, eine Wasserfläche, eine bestimmte Felszone, eine Schneefläche etc., das im Datensatz eindeutig lokalisierbar und durch eine genügend grosse Anzahl Pixel (Kap. 3.4) repräsentiert ist.

Mischkategorie

Darunter versteht man relativ stark streuende Kategorien, die durch natürliche Heterogenität, durch kleinräumig angeordnete Gegebenheiten von Landschaftselementen (Bsp. Nebeneinander von Schneeflecken und Felsen in Steilwänden) oder durch Beeinflussung von umgebenden Oberflächeneinheiten entstehen können.

Um Mischkategorien soweit wie möglich verhindern zu können, sollten immer grossflächige, zusammenhängende Oberflächeneinheiten als Stichproben ausgewählt werden.

3.2 Festlegung der im Untersuchungsgebiet auftretenden Oberflächeneinheiten (Landschaftselemente, Wolken)

Um sämtliche Phänomene, die an der Oberfläche des Untersuchungsgebietes feststellbar sind, erfassen zu können, wäre es nötig, eine sehr grosse Anzahl von Oberflächeneinheiten zu unterscheiden. Je mehr derartige Einheiten in eine Untersuchung einbezogen werden, desto genauer wird die Klassifikation.

Eine Aufgabe unserer Arbeit wird sein, die Klassifikationsergebnisse mit dem "Bodenbild" (Kap. E.9.1) sowohl räumlich als auch quantitativ zu vergleichen. Deshalb soll in einer ersten Arbeitsphase, ungeachtet des rationellen Vorgehens (so wenig Spektralkanäle und Kategorien wie möglich) versucht werden, eine digitale Klassifikation herzustellen, die eine relativ grosse Zahl von Oberflächeneinheiten beinhaltet. Damit soll untersucht werden, wie wirklichkeitsgetreu das natürliche "Bodenbild" mit den verwendeten Klassifikationsalgorithmen wiedergegeben werden kann.

Aus diesem Grunde wird in der ersten Phase eine verhältnismässig grosse Anzahl von Oberflächeneinheiten bestimmt. Dazu bieten sich die drei folgenden, sich ergänzenden Möglichkeiten an:

1. Feststellung der Oberflächeneinheiten auf den MSS-Bildern

In allen zwölf zur Verfügung stehenden Kanälen der MSS-Bilder (Massstab $\approx 1:250'000$) werden die homogenen Flächen von Auge herausgesucht und identifiziert. Dort, wo diese homogenen Flächen nicht als bestimmte Oberflächeneinheiten erkennbar sind, müssen zum Vergleich Landeskarten im Massstab $1:25'000$ beigezogen werden. Wegen der relativ groben Auflösung der Pixel (79×79 m) können mit dieser Methode nur die grössten, markantesten Oberflächeneinheiten bestimmt werden.

2. Identifikation von Oberflächeneinheiten auf dem vom Skylab aufgenommenen photographischen Bildmaterial

Das hochauflösende Bildmaterial des S 190 A-Aufnahmesystems erlaubt es, im gesamten Untersuchungsgebiet kleinflächigere Oberflächeneinheiten auszuscheiden. Im Ueberdeckungsbereich von zwei S 190 A-Photographien ist sogar eine stereoskopische Betrachtungsweise möglich, was einerseits hilft, die Identifikation von Wolken entscheidend zu verbessern, andererseits aber auch, Oberflächeneinheiten in Schattenlage besser zu bestimmen.

3. Festlegung von schlecht identifizierbaren Oberflächeneinheiten auf Luftbildern

Das vom Militärflugdienst zur Verfügung gestellte Unterlagenmaterial erlaubt hauptsächlich, auf den Schnee- und Eisflächen detailliert nach schlecht identifizierbaren Oberflächeneinheiten zu suchen (Bsp. verschmutzter Schnee, Oberflächeneinheiten im Ausaperungsbereich). Leider sind nur von einem Teilbereich des Untersuchungsgebietes Luftbilder vorhanden. Man muss deshalb in dieser Arbeit von der Tatsache ausgehen, dass es im nicht überflogenen Teil schwer erkennbare Oberflächeneinheiten gibt, die nicht erfasst werden konnten.

In Tab. 3 wird das Ergebnis des gesamten Identifikationsverfahrens von Oberflächeneinheiten zusammengestellt.

Schnee trocken SO, flache Hanglage
Schnee trocken SO, steile Hanglage
Schnee am oberen Rand von Gefällbrüchen
Uebergangszone Schneezone-Gefällsteilen
Gefällbrüche mit Seracs
Gefällbrüche unterer Teil
Gletschereis
sehr schmutziges Eis am Ende einer Gletscherzunge
Schnee trocken SA
Schnee-Eiszone SA

Gletscherwasser SO	Bergwald SA
Seewasser SO	Talwald SA
Fluss SO	Bergwiese SA
Wasserrand SO	Rasen SA
Bergwald SO	Felsen SA
Talwald SO	
Bergwiese SO	Wolkenzentrum
Talwiese SO	Wolkenrand
Rasen SO	
Felsen SO	
Geröll SO	
Siedlung SO	

Tab. 3: Vorläufige Festlegung der Oberflächeneinheiten
(Terminologie nach F. WILHELM, 1975).
SO = Sonnenlage / SA = Schattenlage

3.3 Stichprobenwahl

Nach der Bestimmung der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Oberflächeneinheiten mussten dafür die geeigneten Stichproben (Kap. 3.1) lokalisiert werden. Dabei musste darauf geachtet werden, dass für jede Oberflächeneinheit so viele Stichproben wie möglich ausfindig gemacht werden konnten, damit die aus diesen Stichproben zusammengesetzten Kategorien statistisch repräsentativ sind. Zusätzlich mussten die ausgewählten Stichproben möglichst regelmässig über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt liegen, um lokale Erscheinungen von Oberflächeneinheiten und atmosphärische Unsicherheitsfaktoren ausgleichen zu können.

Schliesslich musste bei der Auswahl der Stichprobe darauf geachtet werden, dass die Stichprobenflächen so gross sind, dass keine Beeinflussungen von umgebenden Oberflächeneinheiten (Bsp. Ueberstrahlung) möglich sind.

Neben der genauen Lokalisation der Stichprobenflächen spielte die Abgrenzung dieser Flächen für die statistische Analyse eine entscheidende Rolle. Im nächsten Kapitel wird beschrieben, welche Methoden angewandt wurden, um das Lokalisations- und Abgrenzungsproblem zu lösen. Um dem momentanen Zustand der Landschaft Rechnung zu tragen, wurden in erster Linie die MSS-Bilder verwendet.

3.4 Methoden zur vorläufigen Abgrenzung von Stichproben auf MSS-Bildern

Es gibt verschiedene Methoden, um Stichprobenflächen in einer ersten groben Stufe abgrenzen zu können. Bedingt durch unterschiedliche natürliche Gegebenheiten können sich auftretende Schwierigkeiten bei der Stichprobenbegrenzung stark ändern. Je nach Situation wird das eine oder andere Verfahren angewendet. Die nachfolgende Uebersicht zeigt die verschiedenen Abgrenzungsmethoden auf:

- Abgrenzung von Stichproben auf aufbelichteten MSS-Bildern,
- Abgrenzung von Stichproben auf der Bodenkarte (Kap. E.9.1) mit Hilfe eines Digitalisierungsverfahrens,
- Abgrenzung der Stichproben mit Cluster-Programmen (mehrdimensional).

Im nächsten Abschnitt werden diese Methoden genauer erläutert.

Abgrenzung von Stichproben auf aufbelichteten MSS-Bildern

Um Stichproben auf MSS-Bildern genau lokalisieren zu können, musste bei der Aufbelichtung der MSS-Daten ein Raster miteinbezogen werden, der das Bild in kleine Quadrate von 20 auf 20 Pixel unterteilt. Die herausgesuchten Stichproben konnten nun als Datenblöcke in einem karthesischen Koordinatennetz festgehalten werden. Diese Datenblöcke stellen grössere, mehr oder weniger homogene Flächen dar (d.h. eine Gruppierung von Bildelementen mit ungefähr gleichen Graustufenwerten). An der Stelle, wo eine signifikante Veränderung der Graustufenwerte zu beobachten ist, wurde die Grenze des Datenblocks gesetzt. Dieser von Auge durchgeführten Abgrenzung haftet ein grosser Ungenauigkeitsfaktor an, der aber bei der statistischen Analyse der Stichproben eliminiert werden kann. Aus diesem Grunde kann mit dieser Methode nur eine erste, ungefähre Abgrenzung der Stichprobenflächen erzielt werden.

Abgrenzung der Stichproben aus dem Bodenbild (Kap. E.9.1) mit Hilfe eines Digitalisierungsverfahrens

Stichproben von Oberflächeneinheiten, die im MSS-Bild schwierig auszumachen sind (z.B. Siedlungen) wurden mit der "Digitalisierungsmethode" bestimmt. Zur Verfügung stand ein Digitizer 9864A von Hewlett Packard (HP), der an einen Tischrechner HP-9830A angeschlossen ist.

Mit dem Programm "GEBIET" können im "Bodenbild" (Massstab 1:50'000) die MSS-Bildkoordinaten (Zeilen, Kolonnen) der gesuchten Stichprobenflächen bestimmt werden.

Für die Uebertragung des Koordinatennetzes des MSS-Bildes auf das Bodenbild mussten zwei markante Geländepunkte (z.B. Zusammenfluss zweier Bachläufe) sowohl auf dem Bodenbild als auch im Satellitenbild exakt lokalisiert werden können.

Die mit dieser Methode erreichte Genauigkeit von ± 1 Pixel für die Lagebestimmung der gesuchten Stichprobenflächen reicht völlig aus, da sich die Stichprobenflächen immer aus vielen Pixeln zusammensetzen. Fehlerhafte Einschlüsse konnten in der nachfolgenden Untersuchung auf dem Matrix-Print (Kap. 3.6.1) sofort festgestellt und eliminiert werden.

Abgrenzung von Stichproben mit einem Cluster-Algorithmus

Um innerhalb grösserer, zusammenhängender Stichprobenflächen vorhandene Abstufungen (kommen häufig in extrem gebirgigen Zonen mit verschiedenen Hangexpositionen und Hangneigungen vor) lokalisieren zu können, wurde das in Kap. D.1.2.3 beschriebene Cluster-Programm zu Hilfe gezogen. Es ermöglichte hauptsächlich die Bildung von Unterkategorien (Kap. 3.1). Dank diesem mehrdimensionalen Verfahren können also noch Abgrenzungen vorgenommen werden, die mit den anderen "visuellen" Verfahren nicht mehr durchzuführen wären.

3.5 Stichprobenumfang

Um bei der Stichprobenanalyse statistisch zuverlässige Schätzungen zu erhalten, darf die Pixelanzahl pro Stichprobe eine bestimmte Limite nicht unterschreiten.

Theoretisch wird die untere Schranke der Pixelzahl einer Stichprobe durch die Zahl der benutzten Kanäle ($k + 1$) gegeben. Kleinere Stichproben führen zu einer singulären Kovarianzmatrix und somit zum Verschwinden der Determinante.

Eine exakte Schätzung von Parametern in Verteilungsdichten erfordert theoretisch einen unendlich grossen Stichprobenumfang (NIE-MANN, 1974). Deshalb ist es notwendig, einen vernünftigen Kompromiss zu schliessen. Ein grober Richtwert für den Stichprobenumfang im praktischen Gebrauch wird von verschiedenen Autoren (u.a. LILLESAND, 1976) mit $10k$ als untere Grenze angegeben. Die genauen mathematischen Grundlagen, um die Parameter mit einer bestimmten Zuverlässigkeit schätzen zu können, findet man bei DUDA, 1973.

In dieser Arbeit wurde wenn immer möglich versucht, den geforderten Stichprobenumfang von $10k$ (entspricht 120 Pixeln) mindestens zu erreichen, was aber bei räumlich beschränkten Oberflächeneinheiten nicht immer eingehalten werden konnte. Als Beispiel seien hier die Stichproben der Kategorie "Fluss" genannt. Solche Tatsachen gilt es am Schluss bei der Ueberprüfung der Zuverlässigkeit von Klassifikationsergebnissen zu berücksichtigen.

3.6 Statistische Stichprobenanalyse

Die provisorisch aus den MSS-Bildern gewonnenen Stichprobenblöcke wurden zur Bereinigung, Kontrolle und anschliessenden Berechnung von statistischen Parametern mit dem Programm STAT aus der IBIS-Programmbibliothek bearbeitet.

Das Programm, das für die statistische Auswertung von multidimensionalen digitalen Bildern geschaffen wurde, ermöglicht einerseits die Ermittlung von Mittelwerten, Standardabweichungen, Kovarianzen und Korrelationsmatrizen der Stichproben, andererseits das Ausdrucken von Wertematrizen, Graustufendruckern, Histogrammen und Exmigrammen (graphische Darstellung der Stichprobenmittelwerte und ihrer Standardabweichungen in den vom Benutzer gewünschten Kanälen).

Das Programm ist so strukturiert, dass sowohl interaktiv als auch im Stapelbetrieb gearbeitet werden kann. Im nächsten Kapitel wird beschrieben, wie die Stichproben mit dem Programm STAT bearbeitet wurden.

3.6.1 Vorgehen

Um eine möglichst gute Ausgangslage für eine spätere Klassifikation zu schaffen, müssen die ausgewählten Stichproben ganz bestimmten Anforderungen genügen.

In einem ersten Schritt wurde jeder Stichprobenblock mit Hilfe von Graustufendruckern und Wertematrizen (Fig. 16) bezüglich seiner Homogenität in allen zwölf Spektralkanälen untersucht. Grobe Fremdeinschlüsse konnten, wie Fig. 16 zeigt, sofort erfasst und eliminiert werden. Die Grautonwerte innerhalb einer Stichprobe müssen möglichst einheitlich sein und dürfen eine bestimmte Variationsbreite nicht überschreiten. Es ist die Aufgabe des Interpreten, diese Grenzen zu setzen. Das grosse Problem bei der Abgrenzung liegt darin, dass bei allzu strenger Auslese die Stichprobenflächen zu stark reduziert werden. Die Stichproben sind dann zwar sehr homogen, aber für eine statistische Analyse nicht mehr aussagekräftig (Kap. 3.5). Es gilt hier, einen nicht idealen, aber doch akzeptablen Mittelweg zu finden.

(A)

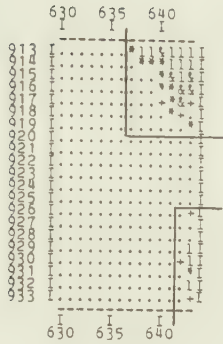


Fig. 16: Graustufendruck (A) und Wertematrix (B) einer zu prüfenden Schneestichprobe

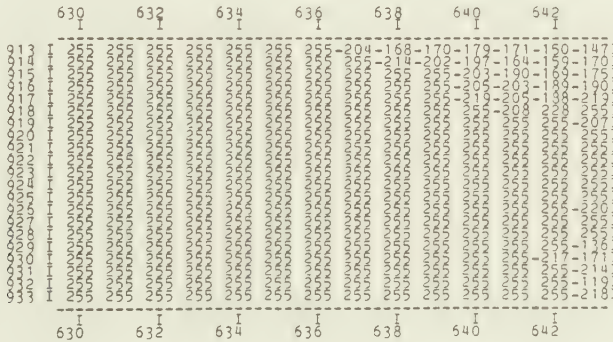
Legende:

Graustufengrenzen (willkürlich festgelegt):

- . 235 - 255 (Videowerte) = Schnee
- + 215 - 235
- * 190 - 215
- & 172 - 190
- 1 86 - 172

Die Signaturen +, *, & und 1 sind Fremdeinschlüsse, die nicht zur Kategorie Schnee gehören. Sie müssen, wie durch die ausgezogene Linie angezeigt, eliminiert werden.

(B)



Legende:

Die Zahlen in der Matrix sind Videowerte. In diesem Beispiel repräsentiert die Zahl 255 Schnee. Alle anderen auftretenden Werte sind Fremdeinschlüsse. Die Negativzeichen vor einigen Zahlen geben an, dass diese Werte mehr als 1σ vom Mittelwert dieser Matrix entfernt liegen.

In der Praxis hat es sich gezeigt, dass sich die Grenzwerte am besten mit Standardabweichungen definieren lassen. Nach sorgfältigen Tests (Stichprobenklassifikationen) wurden für die vorliegende Untersuchung folgende Werte als Schranken festgelegt:

$$\bar{x} - 2.0 s < x < \bar{x} + 2.0 s$$

wobei $\bar{x}$ der Mittelwert und s die Standardabweichung der Stichprobe bedeuten.

Dieses Verfahren wurde nur für die Stichprobenwahl verwendet, weil bei einer Grenze von 2σ neben Ausreißern auch noch richtige, zur Stichprobe gehörende Bildelemente eliminiert würden.

Die Analyse zeigte, dass die meisten Stichproben in irgendeinem Kanal streuen. Vielfach waren es sogenannte Ausreißer, die das Bild verfälschten. Von jeder Stichprobe wurden deshalb Histogramme erstellt, was die Feststellung derartiger fremder Einschlüsse erleichterte. Diese Einschlüsse mussten dann eliminiert werden, indem diejenigen Abschnitte des Datenblocks, in denen die Ausreißer liegen, weggeschnitten wurden. Dadurch verkleinerten sich die Beträge der Varianzen und als Folge davon wurden die Mittelwerte stabilisiert.

Die statistischen Erhebungen wurden für jede einzelne Stichprobe in allen Kanälen durchgeführt. Es gab Stichproben, die mehrfach durchgearbeitet werden mussten, bis in allen Kanälen die erforderliche Genauigkeit erreicht wurde.

3.7 Kategorienstatistik

Nachdem die einzelnen Stichproben gesäubert waren, mussten sie in einem nächsten Arbeitsschritt zu Kategorien zusammengefasst werden.

Das STAT-Programm erlaubt ebenfalls, einzelne Stichproben zu Kategorien zusammenzufassen und dann wieder mit den schon in Kap. 3.6 beschriebenen Verfahren statistisch zu überprüfen. Da die Stichproben einer einzelnen Kategorie verstreut über das gesamte MSS-Bild liegen können, gab es bei der Berechnung der statistischen Parameter der Kategorien auf dem alten IBM-370-Computer oft Speicherplatzprobleme, weil immer das gesamte Untersuchungsgebiet (1'600'000 Pixel x 12 Kanäle) auf Disk gespeichert werden musste. Dieses Problem löste sich mit Inbetriebnahme des grossen IBM-3033-Computers.

Bei der Berechnung der Kategorienstatistik zeigte sich, dass der Vorgang der Ausreisser-Elimination praktisch überall wiederholt werden musste. Die Mittelwerte aller Stichproben einer Kategorie differierten oft so stark, dass erneut Werte auftraten, die mehr als 2σ vom neuen Mittelwert entfernt lagen. Einzelne Kategorien zeigten eine derart grosse Streuung, dass sie in Unterkategorien (Kap. 3.1) aufgeteilt werden mussten (Fig.17).

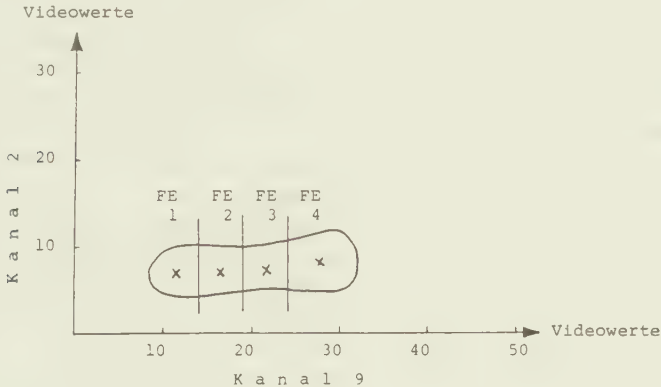


Fig. 17: Aufspaltung von stark streuenden Kategorien in Unterkategorien am Bsp. Felsen Schatten

3.8 Sekundäre Stichprobenwahl

Nach Berechnung der statistischen Parameter aller Kategorien mit dem STAT-Programm liess sich eine erste, probeweise Klassifikation mit dem DCLAS-Algorithmus (Kap. D.1.1.1) im Testgebiet durchführen.

Das Klassifikationsergebnis wurde anschliessend systematisch mit dem Bodenbild (Kap. E.9.1) verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass an einigen Stellen grössere, homogene Flächenanteile einer bestimmten Kategorie zugeordnet wurden, was aber nach Vergleich mit diesem Bodenbild völlig unmöglich sein konnte.

Die Koordinaten dieser grossflächig, falsch klassierten Areale wurden herausgesucht und davon die statistischen Werte berechnet. Dabei stellte sich heraus, dass es sich um neue Kategorien handeln musste, die in der bisherigen Aufstellung (Tab. 3) noch nicht ausgeschieden worden waren.

Die Stichprobenflächen wurden darauf im Bodenbild und den Luftbildern zu identifizieren versucht. Mit diesem Rückwärtsverfahren konnten die Kategorien Schotter/Moräne und ausapernder Schnee sowie eine zusätzliche Fels-Schatten-Kategorie neu bestimmt werden.

3.9 Zuordnung der Kategorien zu den Hauptkategorien

In einem letzten Schritt mussten die Kategorien wieder in die übergeordneten Hauptkategorien (Kap. 3.1) zusammengefasst werden.

Die sinngemässe Verteilung der in Tab. 4 aufgeführten Kategorien in die zwei Hauptkategorien "Schnee" und "schneefreie Zone" gab etliche Probleme auf, die hauptsächlich bei der Zusammenstellung der Hauptkategorie "Schnee" auftraten.

Wie aus Kap. C.3 hervorgeht, hatte es im Zeitpunkt der Aufnahme im Untersuchungsgebiet seit fast einem Monat keinen Niederschlag mehr gegeben. In der vergletscherten Hochalpenstufe waren ausser Neuschnee deshalb alle möglichen Uebergänge von metamorphem Altschnee über körnigen Firnschnee bis zu weissem und bläulichem Firneis auszumachen.

Die in verschiedenen Umwandlungsstadien stehenden Schnee- resp. Eisarten zeigen ein unterschiedliches spektrales Verhalten (Kap. B.4.2). Die ungefähre Lage der im Untersuchungsgebiet festgestellten Schnee- resp. Eiskategorien wird in Fig. 18 schematisch dargestellt. Die genauen Kategorien-Bezeichnungen ergeben sich

aus Tab. 4. Gegenüber den winterlichen Schnee-Verhältnissen, wie sie z.B. im Flachland zu finden sind, wirken sich diese verschiedenenartigen Schnee- resp. Eisbedingungen für eine Identifikation äusserst erschwerend aus. Diese Verhältnisse zwangen uns, in der Hauptkategorie "Schnee" auch die Eiszone miteinzubeziehen. Die Uebergänge Schnee zu Eis sind in der Gletscherzone im Spätsommer so fliessend, dass das Entscheidungskriterium, was noch dem Schnee, was dem Eis zugeordnet werden soll, selbst von einem Interpreten, dem neben den spektralen Eigenschaften der Untersuchungsobjekte auch noch andere Parameter (Bsp. Textur) zur Verfügung stehen, nur mit grösster Mühe gefunden werden könnte. Unsere digitalen Klassifikationsverfahren, die allein auf Grund von spektralen Unterschieden eine Trennung von Objekten vornehmen, können mindestens im Auflösungsbereich von 79 m diese vielen Schnee-Eisübergänge nicht signifikant trennen.

Im Laufe der Stichprobenanalyse musste noch eine weitere, die Klassifikation störende Tatsache zur Kenntnis genommen werden. Am Rande der Wasserwolken, wo der schneefreie Boden schon halbwegs durchscheint, entsteht eine Mischsignatur. Die Strahldichte dieser Mischkategorie (Wolkenrand - schneefreie Zone) entspricht ungefähr den Werten der Mischkategorie "ausapernder Schnee" (Schotter-Felsen-Schnee). Eine signifikante Trennung dieser zwei vollständig voneinander verschiedenen Kategorien ist mit unseren Klassifikationsalgorithmen nicht möglich. Aus diesem Grunde musste entschieden werden, dass die Kategorie "ausapernder Schnee" nicht, wie es viele Autoren in früheren Arbeiten getan haben, der Hauptkategorie "Schnee", sondern der Hauptkategorie "schneefreie Zone" zuzuordnen ist. Der flächenmässige Anteil der Kategorie "ausapernder Schnee" ist in unserem Fall gegenüber der flächenmässigen Ausdehnung der Wolkenrand-Mischsignatur kleiner (nur etwa 45 %).

Die Konsequenz dieser Entscheidung liegt darin, dass die von uns klassierten Schneeflächen gegenüber den effektiven Schneeflächen etwas zu klein sein werden.

Die definitive Zusammenstellung aller Kategorien und ihre Zuordnung zu den Hauptkategorien "Schnee" und "schneefreie Zone" wird in Tab. 4 gezeigt.

Die grosse Zahl von 42 Kategorien drängt die Frage auf, warum so viele Kategorien herausgesucht werden mussten. Der Grund liegt darin, dass man zu Beginn einer Untersuchung noch nicht wissen kann, wieviele, und was noch wichtiger ist, welche Kategorien benötigt werden, um eine geforderte Hauptkategorie genau extra-hieren zu können. Deshalb müssen anfänglich so viele (man könnte auch sagen: zu viele) Kategorien in die Klassifikationsverfahren einbezogen werden.

Zum Schluss sei noch auf ein anderes Problem eingegangen. Bei der Betrachtung der Kategorien in der Hauptkategorie "schneefreie Zone" fallen die manchmal etwas undifferenzierten Bezeichnungen auf (Bsp. Bergwald, Talwald). Da in dieser Arbeit aber der Schnee und nicht die Landnutzung untersucht werden soll, erübrigt es sich, genauere Namen-Zuteilungen in den für unsere Untersuchung nicht relevanten Kategorien vorzunehmen.



Fig. 18: Lokalisation der Schnee-Eis-Oberflächeneinheiten auf den Gletschern. Legende siehe Tab. 4, Kategorie 1 - 10.

HAUPTKATEGORIE "SCHNEE - EIS"

- 1 Schnee trocken SO, flache Hanglage
- 2 Schnee trocken SO, Hanglage 30°
- 3 Schnee trocken SO, steile Hanglage
- 4 Schnee am oberen Rand von Gefällbrüchen
- 5 Uebergangszone Schneezone-Gefällsteile, z.T. schon Eis hervortretend, SO
- 6 Gefällbrüche mit Seracs, in der Schnee und Eis in gleichem Masse vertreten sind, SO
- 7 Gefällbrüche unterer Teil, hauptsächlich Eis, das z.T. stark verschmutzt ist, SO
- 8 Gletschereis 1, SO
- 9 Gletschereis 2, SO
- 10 Sehr schmutziges Eis am Ende einer Gletscherzunge sowie Schneezone mit Ausaperungsstellen in Steilwänden am Schatten
- 11 Schnee trocken 1, SA
- 12 Schnee trocken 2, SA
- 13 Schnee-Eiszone, SA

HAUPTKATEGORIE "SCHNEEFREIE ZONE"

- | | |
|-----------------------|---|
| 14 Wolkenzentrum | 28 Geröll SO |
| 15 Wolkenrand 1 | 29 Siedlung SO |
| 16 Wolkenrand 2 | 30 Schotter/Moränen SO |
| 17 Wolkenrand 3 | 31 Bergwald SA |
| 18 Gletscherwasser SO | 32 Talwald SA |
| 19 Seewasser SO | 33 Bergwiese 1, SA |
| 20 Fluss SO | 34 Bergwiese 2, SA |
| 21 Wasserrand SO | 35 Rasen SA |
| 22 Bergwald SO | 36 Felsen 1, SA |
| 23 Talwald SO | 37 Felsen 2 SA |
| 24 Bergwiese SO | 38 Felsen 3 SA |
| 25 Talwiese SO | 39 Felsen 4 SA |
| 26 Rasen SO | 40 ausapernder Schnee |
| 27 Felsen SO | 41 Mischkategorie Wolkenrand/
schneefreie Zone 1 |
| | 42 Mischkategorie Wolkenrand/
schneefreie Zone 2 |

Tab. 4: Vollständige Kategorienauswahl (Terminologie nach WILHELM, 1975), SO = Sonnenlage / SA = Schattenlage

4. Klassifikationen

4.1 DCLAS-Algorithmus

4.1.1 Stichprobenklassifikation

Das sowohl interaktiv als auch im Stapelbetrieb (Kap. E.16) benutzbare DCLAS-Programm aus der IBIS-Programmbibliothek braucht als Eingabe zur Berechnung der minimalen Distanzen die Mittelwerte aller Kategorien. Der Benutzer hat zusätzlich noch eine Option, in die Klassifikation einzugreifen: Er kann für jede Kategorie Schranken ("Thresholds", STEINER, 1973) setzen, die es ermöglichen, Fehlklassierungen zu reduzieren. In einem solchen Fall werden nur jene Pixel einer vorgegebenen Kategorie zugeordnet, die innerhalb eines vom Benutzer angegebenen Distanzmasses liegen.

Der DCLAS-Algorithmus wurde vorerst dazu verwendet, die in der Statistik-Analyse festgelegten Stichproben auf ihre Eignung für eine Klassifikation zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurde zuerst eine Klassifikation im 12-dimensionalen Variablenraum mit allen Stichproben durchgeführt, wobei keine Schranken gesetzt wurden. Dabei zeigte sich, dass gewisse Stichproben trotz einer Streuung $\leq 2\sigma$ so nahe bei anderen Kategorien lagen, dass daraus Fehlklassierungen resultierten.

In einem zusätzlichen Statistik-Verfahren (Kap. 3.6) mussten solche kategorienfremde Bildelemente so weit wie möglich aus den Stichproben entfernt werden.

Hierbei stellte sich die Frage, welche prozentuale Fehlerquote für Ausreisser innerhalb einer Kategorie toleriert werden darf. Vorerst wurde versucht, eine unter den oben genannten Bedingungen extrem niedrige Fehlerquote von 1 % zu erreichen. Dies gelang jedoch aus zwei Gründen nicht:

1. Gewisse Kategorien liegen im Merkmalsraum so nahe beieinander, dass Fehlklassierungen unumgänglich sind.
2. Mischkategorien werden zwangsläufig von verschiedenen Kategorien beeinflusst.

Deshalb wurde in der Stichprobenklassifikation die schon in anderen Arbeiten (GFELLER, 1975) angewandte Fehlergrenze von 5 % als Grundlage gewählt.

Die Stichproben dienen als Vorlage für die nachfolgenden, eigentlichen Klassifikationen. Damit bestimmen sie implizit auch deren Genauigkeit. Es muss also darauf geachtet werden, den Fehler so klein wie möglich zu halten. Eine grössere Fehlerquote als 5 % schon am Anfang des gesamten Klassifikationsablaufes würde nach den Fehlerfortpflanzungsgesetzen den Fehler

bis zum Schluss in einem nicht mehr tolerierbaren Umfang steigern. Das würde aber den gesamten Aufwand der digitalen Auswertung gegenüber den billigen, aber ungenaueren analogen Verfahren nicht mehr rechtfertigen.

Mit den "bereinigten" Stichproben wurde nun eine zweite DCLAS-Stichproben-Klassifikation durchgeführt. Die Resultatsübersicht ist in Tab. 5 zusammengestellt. Es kann dort abgelesen werden, wieviel Prozent der einer Kategorie zugehörigen Bildelemente auf Grund des Trennverfahrens wieder der gleichen Kategorie zugeordnet wurden und wieviel Prozent "Fehlklassierungen" auftraten.

Die Resultatsmatrix wurde in die zwei für diese Arbeit relevanten Hauptkategorien "Schnee-Eis" und "schneefreie Zone" unterteilt. Die wenigsten Kategorien zeigen 100 % "Richtigklassierungen". In zwei Fällen (Kategorie 20 und 30) mussten sogar 20 % resp. 37.8 % Fehlklassierungen in Kauf genommen werden. Diese Angaben scheinen der Anforderung nach einer 5 %-Limite zu widersprechen. Die falschen Zuordnungen erfolgten aber, wie in den meisten anderen Fällen, innerhalb der gleichen Hauptkategorie. Mit dem Begriff "Fehlklassierung" ist demnach vorsichtig umzugehen. Die Genauigkeit der geforderten Schnee-Eis-Klassierung wird überhaupt nicht betroffen, wenn nur innerhalb der gleichen Hauptkategorie Fehlzuordnungen auftreten.

Effektive Fehlklassierungen betreffen nur jene Fälle, bei denen Pixel von der einen Hauptkategorie in die andere zugeordnet wurden.

Haupt- Kat.	Kat. richtig No. klassiert	Fehlzuordnungen in eigene Hauptkat.	Fehlzuordnungen in andere Hauptk.
	%	%	%
Schnee - Eis	1 100		
	2 100		
	3 100		
	4 100		
	5 100		
	6 97.81	2.19	
	7 98.44	1.56	
	8 100		
	9 100		
	10 96.60	2.27	1.14
	11 98.86		1.14
	12 100		
	13 99.22	0.78	
schneefreie Zone	14 100		
	15 100		
	16 97.62	2.38	
	17 100		
	18 100		
	19 100		
	20 80	20	
	21 98.28	1.29	0.43
	22 99.14	0.86	
	23 98.95	1.05	
	24 99.39	0.61	
	25 100		
	26 97.78	2.22	
	27 96.43	3.57	
	28 93.30	6.70	
	29 98.39	1.61	
	30 62.22	37.78	
	31 95.76	4.24	
	32 97.76	2.24	
	33 97.22	2.78	
	34 100		
	35 98.06	1.94	2.86
	36 99.12	0.88	
	37 97.14		
	38 97.01	2.99	
	39 93.42	6.58	
	40 100		
	41 100		
	42 98.17	1.83	

Tab. 5: Ergebnis der DCLAS-Stichprobenklassifikation mit 42 Kategorien und 12 Kanälen (Kategorien-Nr. siehe Tab. 4).

4.1.2 Klassifikation des Testgebietes

Erste Klassifikationen mit dem DCLAS-Algorithmus ohne irgendwelche Schranken ergaben trotz den guten Stichproben im Testgebiet ungenügende Resultate. Die Stellung einiger Kategorien im Variablenraum lässt darauf schliessen, dass sie von Nachbarkategorien Pixel beziehen und so prozentual zu häufig erscheinen (Bsp. Siedlung). Ein Versuch, die Schranken über alle 42 Kategorien hinweg mit 1σ anzugeben, scheiterte, da nur 52 % der Testfläche klassiert wurden. Die Ausdehnung der Schranken auf 2σ ergab immer noch das ungenügende Resultat von nur 64 % klassierter Bildelemente. Unter Beiziehung einer vom Programm gelieferten Tabelle, die die Distanzen der Mittelpunkte der einzelnen Kategorien zueinander im Variablenraum angibt, wurden in der Folge nur noch diejenigen Kategorien begrenzt, die eindeutig falsche Resultate lieferten, da sie sehr nahe bei anderen Kategorien liegen.

Im Verlauf einer Anzahl Versuche mussten nun gewisse Kategorien-grenzen so weit verschoben werden, bis ein nach dem Vergleich mit der Bodenkarte gutes Ergebnis (siehe Kap. E.9) vorlag. Abb. 2 und Tab. 6 geben die entsprechenden Resultate wieder. Vergleiche mit der Bodenkarte und anderen Klassifikationen finden sich in Kap. E.11.3.

Es muss an dieser Stelle deutlich darauf hingewiesen werden, dass bei jeder Klassifikation (auch MCLAS) nicht einfach die Stichproben-Statistik angewandt, mit einem Klassifikationsalgorithmus bearbeitet und ein gutes, endgültiges Resultat erwartet werden kann. Hinter jedem Schlussergebnis steckt eine Menge Arbeit, sei es durch systematisches Anpassen von Kategoriengrenzen oder aber durch minuziöses Vergleichen mit der Bodenkarte, um neue Erkenntnisse für die Verschiebung von Schranken zu gewinnen.



Abb. 2: Resultat der DCLAS-Klassifikation 42 Kat/12 Kan des Testgebietes (Kap. C.2). Darstellung in den zwei Hauptkategorien "Schnee-Eis" (schwarz) und "schneefreie Zone" (weiss). Massstab ca. 1:350'000

Kat. Nr.	Anzahl Pixel	%	Haupt- Kat.
1	1'548	4.48	Schnee - Eis
2	1'163	3.37	
3	104	0.30	
4	804	2.33	
5	315	0.91	
6	657	1.90	
7	802	2.23	
8	212	0.61	
9	473	1.37	
10	689	1.99	
11	213	0.62	
12	16	0.05	
13	92	0.27	

14	0	0.00	schneefreie Zone
15	296	0.86	
16	277	0.80	
17	311	0.90	
18	2	0.01	
19	8	0.02	
20	400	1.16	
21	41	0.12	
22	1'614	4.67	
23	2'857	8.27	
24	3'205	9.27	
25	851	2.46	
26	1'935	5.60	
27	876	2.51	
28	4'227	12.23	
29	0	0.00	
30	36	0.10	
31	568	1.64	
32	2'183	6.32	
33	1'683	4.87	
34	43	0.12	
35	453	1.31	
36	528	1.53	
37	586	1.70	
38	1'966	5.69	
39	1'462	4.23	
40	530	1.53	
41	356	1.03	
42	187	0.54	
Nicht klas. 0		0.00	
Total 34'560		100.00	

Tab. 6: Ergebnisse der DCLAS-Klassifikation mit 42 Kategorien und 12 Kanälen im Testgebiet

4.2 MCLAS-Algorithmus

Wie in Kap. D.1.1.2 gezeigt, verbessert sich beim MCLAS-Algorithmus die Qualität des Ergebnisses mit der Anzahl der Kanäle, die in die Klassifikation einbezogen werden. Mit zwölf Kanälen sollten also gute Klassifikationsergebnisse erreicht werden können, sofern einheitliche und repräsentative Stichproben bestimmt wurden. Beim ersten MCLAS-Klassifikationsversuch stellte sich aber heraus, dass die Stichproben von Schnee in den Kanälen des sichtbaren Bereichs zu einheitlich waren (jedes Pixel erreichte den höchst möglichen Videowert von 255), so dass die Verarbeitung mitten in der Berechnung wegen einer Null-Division abbrach.

Absolut homogene Schneeflächen mit einem Mittelwert von 255 und einer Standardabweichung von Null erfüllen die Bedingungen einer Normalverteilung nicht, wie sie bei statistischen Klassifikationsverfahren verlangt werden. Die Kovarianzmatrizen enthalten in den Kanälen, in denen die "Problem"-Kategorien saturieren (Kap. B.5) Null-Werte. Folglich weisen die aus den Kovarianzmatrizen berechneten Korrelationsmatrizen in den betreffenden Kanälen ebenfalls durchgehend einen Korrelationskoeffizienten von Null auf (auch in der Diagonalen). Dadurch entstehen lineare Abhängigkeiten, d.h. die Korrelationsmatrix ist singulär und die dazugehörige Determinante gleich Null. Um die Eigenwerte in der Hauptkomponentenanalyse berechnen zu können, muss aber durch die Determinante dividiert werden, was zum sofortigen Abbruch des Rechenverfahrens führt.

Da die Schneekategorien (Kategorien 1, 2, 3 und 9) gemäss Tab. 4 und die Wolkenkategorien (Kategorien 14 und 16) im Extremfall in sieben Kanälen Standardabweichungen von Null haben, konnten für das MCLAS-Klassifikationsverfahren noch fünf Kanäle (6, 7, 8, 11 und 12) verwendet werden. Diese Kanäle erlaubten aber nur eine ungenügende Trennung von Schnee in Schattenlage gegen Kategorien der "schneefreien Zone". Es musste daher nach einem Ausweg gesucht werden, um auch mit dem MCLAS gute Schneeklassifikationen liefern zu können. Schliesslich konnten zwei Methoden gefunden werden, die eine Verwendung des Algorithmus ermöglichen:

1. Künstliche Einbeziehung von "Korrektur"-Bildelementen in die "Problem"-Kategorien.
2. Merge-Verfahren.

4.2.1 Künstliche Einbeziehung von "Korrektur"-Bildelementen in die "Problem"-Kategorien

Mit dieser Methode werden künstlich Bildelemente in diejenigen Kategorien eingeführt, die einen Mittelwert von 255 und eine Standardabweichung von Null aufweisen. Der Vorgang bewirkt, dass die absolute Homogenität dieser Kategorien verloren geht und dadurch eine statistische Weiterverarbeitung möglich wird (deshalb die Bezeichnung "Korrektur"-Bildelement). Damit nicht alle Pixel auf eine Gerade zu liegen kommen (mit Korrelation = 1), mussten im Minimum zwei "Korrektur"-Bildelemente gesucht werden.

Es stellte sich aber schnell heraus, dass es äusserst schwierig ist, im Bild ein ideales "Korrektur"-Bildelement über alle zwölf Kanäle hinweg zu finden. Viele solcher Bildelemente können in zehn von zwölf Kanälen einen relativ geringen Abstand zum jeweiligen Mittelwert aufweisen, in den restlichen Kanälen aber Abweichungen von über 100 Werten zeigen, was zu untolerierbaren Standardabweichungen führen würde. Denn Kategorien mit grossen Standardabweichungen beeinflussen eine MCLAS-Klassifikation negativ, weil sie sich mit anderen Kategorien überlagern.

Aus diesem Grunde musste systematisch nach "Korrektur"-Bildelementen gesucht werden. Dazu wurde der PPD-Algorithmus¹⁾ zu Hilfe gezogen. In jedem Kanal wurde um den jeweiligen Mittelwert eine obere und untere Grenze im Abstand von 2σ gelegt. Bei den "Problem"-Kategorien beträgt dieser Wert 230. Ueberraschenderweise entsprachen diesen Bedingungen nur ganz vereinzelte Bildelemente. Diese wurden dann als "Korrektur"-Bildelemente verwendet.

Auch mit diesen "Korrektur"-Bildelementen gelang es jedoch nicht, in allen "Problem"-Kategorien die Korrelationskoeffizienten zwischen einzelnen Kanälen so zu ändern, dass sie entscheidend von 1 abwichen. Aus diesem Grunde scheiterte das Vorhaben, alle zwölf Kanäle ins Klassifikationsverfahren einzubeziehen. Versuche, noch extremere "Korrektur"-Bildelemente zu benutzen, ergaben bei der Stichprobenklassifikation völlig ungenügende Resultate (bewirkten zu grosse Standardabweichungen in diesen "Problem"-Kategorien). Die Resultate der endgültigen Stichprobenklassifikation sind in Tab. 7 aufgezeichnet (im Vergleich dazu sind die Resultate der DCLAS-Stichprobenklassifikation in Tab. 5 zu finden).

- 1) Klassifikation nach der Rechtecksmethode: Der Messraum wird in rechteckige Entscheidungsregionen unterteilt. Bei jedem zu klassierenden Bildelement muss der Computer entscheiden, welcher rechteckigen Entscheidungsregion es zugeordnet werden soll.

Haupt-Kat.	Kat. Nr.	richtig klassiert %	Fehlzuordnungen in eigene Hauptkat. %	Fehlzuordnungen in andere Haupt. %
Schnee - Eis	1	98.27	1.15	0.58
	2	98.32	0.56	1.12
	3	93.65	4.76	1.59
	4	100		
	5	100		
	6	99.45	0.55	
	7	100		
	8	100		
	9	100		
	10	93.18	5.68	1.14
	11	97.73	2.27	
	12	100		
	13	99.22	0.78	
schneefreie Zone	14	96.67	2.50	0.83
	15	100		
	16	100		
	17	100		
	18	98.84	1.16	
	19	99.92	0.08	
	20	85	15	
	21	94.42	5.15	0.43
	22	97.84	2.16	
	23	100		
	24	100		
	25	100		
	26	99.05	0.95	
	27	98.21	1.79	
	28	97.52	2.48	
	29	98.39	1.61	
	30	89.42	10.58	
	31	100		
	32	93.28	6.72	
	33	100		
	34	100		
	35	91.75	8.25	
	36	98.23	1.77	
	37	98.57	1.43	
	38	100		
	39	98.68	1.32	
	40	97.78	2.22	
	41	100		
	42	100		

Tab. 7: Ergebnis der endgültigen MCLAS-Stichprobenklassifikation mit 42 Kategorien und 8 Kanälen (Kategorien-Nummern siehe Tab. 4)

Schliesslich konnte die MCLAS-Klassifikation im Testgebiet mit acht Kanälen (Kanal-Nr. 2,4,5,6,7,9,11 und 13), die nach dem in Kap. E.5 beschriebenen Kanalselektionsverfahren ausgesucht wurden, durchgeführt werden. Dem Benutzer wurde dabei mit einer "Threshold"-Option noch die Möglichkeit gegeben, die Klassifikation zu beeinflussen.

Die "Threshold"-Option wird in Form von Standardabweichungen eingegeben. Alle Pixel, die ausserhalb der vorgegebenen σ -Grenze der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve der Kategorien liegen, werden nicht klassiert. Leider gilt der eingegebene σ -Wert für alle Kategorien. Manchmal wäre es vorteilhafter, bei einzelnen "störenden" Kategorien (Bsp. "künstlich korrigierte" Schneekategorien) spezifische σ -Werte einzusetzen, um das Klassifikationsergebnis verbessern zu können. Systematisch wurden nun Klassifikationsversuche mit aufsteigendem σ -Wert durchgeführt und mit dem "Bodenbild" verglichen. Das beste Resultat mit acht Kanälen ergab sich bei 4.5σ . Die Resultate sind in Abb. 3 und Tab. 8 dargestellt. Der qualitative und quantitative Vergleich mit dem "Bodenbild" wird in Kap. E.11.6.2 gezeigt. Da mit dieser Methode kein grosser zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist und dennoch gute Resultate erzielt werden konnten, wurde mit dieser Klassifikationsvariante weitergearbeitet.



Abb. 3: Resultat der MCLAS-Klassifikation 42 Kat/8 Kan des Testgebietes (Kap. C.2). Darstellung in den zwei Hauptkategorien "Schnee-Eis" (schwarz) und "schneefreie Zone" (weiss). Massstabca. 1:350'000

Kat. Nr.	Anzahl Pixel	%	Haupt- Kat.
1	1'549	4.48	Schnee - Eis
2	1'083	3.13	
3	50	0.14	
4	825	2.39	
5	402	1.16	
6	663	1.92	
7	771	2.23	
8	125	0.36	
9	395	1.14	
10	692	2.00	
11	203	0.59	
12	12	0.03	
13	47	0.14	
14	0	0.00	schneefreie Zone
15	59	0.17	
16	362	1.05	
17	254	0.79	
18	0	0.00	
19	4	0.01	
20	207	0.60	
21	9	0.03	
22	1'058	3.06	
23	1'666	4.82	
24	3'464	10.02	
25	579	1.68	
26	2'417	6.99	
27	1'498	4.33	
28	2'706	7.83	
29	67	0.19	
30	1'674	4.84	
31	389	1.13	
32	1'925	5.57	
33	1'744	5.05	
34	25	0.07	
35	623	1.80	
36	564	1.63	
37	708	2.05	
38	2'519	7.29	
39	1'634	4.73	
40	418	1.21	
41	657	1.90	
42	188	0.54	
Nicht klas.	325	0.94	
Total	34'560	100.00	

Tab. 8: Ergebnisse der MCLAS-Klassifikation mit 42 Kategorien und 8 Kanälen im Testgebiet

4.2.2 Merge-Verfahren

Die Idee des Merge-Verfahrens liegt darin, die Schnee-Klassifikation in zwei Schritten durchzuführen.

Die "Problem"-Kategorien einerseits und die übrigen Kategorien andererseits werden in zwei separaten Durchgängen klassiert und die beiden Klassifikationsergebnisse anschliessend in einem Merge-Verfahren wieder zu einem Bild zusammengefügt. Der grosse Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass bei den "nicht-saturierenden" Kategorien alle zwölf Kanäle in die Klassifikation einbezogen werden können und damit (nach Kap. D.1.1.2) ein den Möglichkeiten entsprechendes, optimales Resultat erwartet werden darf. Bei der Klassifikation der "Problem"-Kategorien fallen alle Kanäle weg, in denen diese Kategorien den Mittelwert 255 aufweisen, was bewirkt, dass auch hier mit der bestmöglichen Anzahl Kanäle gearbeitet werden kann.

Das Zusammenlegen der beiden Klassifikationen wird durch das Merge-Programm vorbereitet. Es hat die Aufgabe, die auf zwei Files gespeicherten Klassifikationsergebnisse auf ein File mit zwei "Klassifikations"-Kanälen zu kopieren. Die auf den Files gespeicherten Ergebnisse setzen sich aus Signaturwerten zusammen. Diese Signaturwerte werden dazu benötigt, den Output einer Klassifikation graphisch darzustellen. Vor einer Klassifikation wird jeder Kategorie willkürlich vom Interpretieren ein Signaturwert zugeordnet (z.B. Zahl, Buchstabe, Satzzeichen). Jedes in eine bestimmte Kategorie klassierte Pixel nimmt dann diesen entsprechenden Signaturwert an.

Die Signaturwerte der Kategorien sind für den zweiten Schritt des Merge-Verfahrens, der eigentlichen Zusammenfügung der beiden Klassifikationen mit einem PPD-Algorithmus, von Bedeutung. Sie bilden die notwendigen Entscheidungsräume (Kap. 4.2.1), in die dann die Pixel endgültig klassiert werden sollen. Die unteren und oberen Abgrenzungen dieser Entscheidungsräume werden durch den Wert der Kategoriensignatur vorgegeben.

Vor der PPD-Klassifikation müssen aber die auf dem Merge-File gespeicherten Signaturwerte noch in ein dezimales Wertesystem transformiert werden. Hat z.B. im ersten "Klassifikations"-Kanal eine Kategorie die Signatur "Z", so entspricht das im dezimalen System dem Wert 233. Da die Kategorie "Z" nur durch diese Zahl festgelegt ist, müssen die obere und untere Grenze im PPD-Programm den Wert 233 erhalten. Bei der Durchführung der PPD-Klassifikation werden nun alle Pixel, die im ersten "Klassifikations"-Kanal den Wert 233 aufweisen, dem Entscheidungsraum "Z" zugeteilt. Im zweiten "Klassifikations"-Kanal (Resultate der anderen Klassifikation) muss beim Auftreten einer Signatur im ersten Kanal (in unserem Bsp. "Z") unbedingt eine Leerstelle sein, weil sonst eine Mehrfachklassierung auftritt.

Die Grundlagen für das Merge-Verfahren bilden die beiden Einzelklassifikationen. Dafür mussten vorerst die Kategorien aus dem Statistik-File herausgesucht werden, die in irgendeinem Kanal den Mittelwert 255 aufweisen. Für die zwölf Kategorien (Schnee- und Wolkenkategorien), die diese Bedingung erfüllen, musste ein neues Statistikfile berechnet werden, wie es für eine MCLAS-Klassifikation notwendig ist. Auch die übrigen 30 Kategorien wurden auf einem File neu organisiert (dieses File enthielt auch die nicht saturierten Schneekategorien).

Bei den anschliessenden Testklassifikationen drängte sich die Frage auf, wie die σ -Grenzwerte in den einzelnen Klassifikationen gelegt werden müssen, damit beim anschliessenden Merge-Verfahren keine Ueberschneidungen (d.h. Mehrfachklassierungen) vorkommen. Eine Versuchsreihe mit steigenden σ -Grenzwerten brachte die Erkenntnis, dass bei kleinen σ -Werten wohl keine Ueberschneidungen zwischen den beiden komplementären Klassifikationsergebnissen auftraten, dafür aber beim Merge-Bild ein viel zu hoher Anteil von nichtklassierten Bildelementen in Kauf genommen werden musste. Bei den Fällen der Versuchsreihe, bei denen Mehrfachklassierungen vorkamen, konnte festgestellt werden, dass sich ausschliesslich Schneekategorien überschneiden, da ja sowohl die 12er als auch die 30er-Klassifikation solche Kategorien beinhalten. Weil im Merkmalsraum die Schneekategorien der 30er-Klassifikation den Schneekategorien der 12er-Klassifikation am nächsten liegen, kam es bei Ausdehnung der σ -Grenzen zuerst bei diesen Kategorien zu Ueberschneidungen. Diese Tatsache lässt sich in Tab. 9 am besten bei Kategorie 6 (12er-Klassifikation) und Kategorie 7 (30er-Klassifikation) beobachten. Beide flächenmässig grossen Kategorien verschwinden in der Merge-Klassifikation zum grössten Teil, treten dann aber, wie die Resultatsanalyse zeigt, in der Klasse "mehrfach klassiert" wieder auf.

Um eine möglichst kleine Zahl Mehrfachklassierungen zu erhalten, gleichzeitig aber eine hohe Klassifikationsrate, mussten bei der 30er-Klassifikation 4.0σ , bei der 12er-Klassifikation 3.5σ als Grenzwert gesetzt werden.

Die Resultatsanalyse ergab, dass Ueberschneidungen unsere Untersuchung nur in dem Sinne beeinträchtigen, als innerhalb der Schneeflächen die unterschiedlichen Schneezustände nicht mehr festgelegt werden können. Die Abgrenzung der Schneefläche gegen schneefreie Gebiete aber, die für diese Arbeit relevant ist, wird nicht tangiert. Der Vergleich des Klassifikationsergebnisses mit dem Bodenbild ergab ein gutes Resultat. Diese erfreuliche Tatsache zeigt, dass bei ungünstigen statistischen Voraussetzungen das Merge-Verfahren anstelle anderer Klassifikationsverfahren für die Schneeflächenkartierung eingesetzt werden kann. Tab. 9 gibt einen Ueberblick über die zwei zusammengefassten Einzelklassifikationen und die "gemergte" Klassifikation. Abb. 4 zeigt das Resultat der Merge-Klassifikation.

Für den weiteren Verlauf der Arbeit musste die Entscheidung getroffen werden, mit welcher der beiden MCLAS-Verfahren weitergearbeitet werden sollte. Sowohl das erste Verfahren (künstliche Einbeziehung von "Korrektur"-Bildelementen in die "Problem"-Kategorien) als auch das Merge-Verfahren lieferten gute Klassifikationsergebnisse. Die Kosten des Merge-Verfahrens liegen aber eindeutig höher als beim Verfahren mit künstlicher Einbeziehung von "Korrektur"-Bildelementen. Selbst der Versuch, die Kanalzahl beim Merge-Verfahren zu vermindern, konnte den Kostengegensatz nicht aufheben, obwohl bei der 30er-Klassifikation mit Hilfe des Kanalselektionsverfahrens bis auf sechs Kanäle, bei der 12er-Klassifikation sogar bis auf drei Kanäle reduziert werden konnte, ohne dass sich das Klassifikationsergebnis signifikant verschlechtert hätte. Aus diesem Grunde wurde in der weiteren Arbeit nur noch die "Korrektur"-Bildelement-Methode berücksichtigt.



Abb. 4: Resultat der Merge-Klassifikation im Testgebiet. Darstellung in den zwei Hauptkategorien "Schnee-Eis" (schwarz) und "schneefreie Zone" (weiss).
Massstab ca. 1:350'000

Kat. Nr.	Einzelklassifikationen			Merge-Klassifikationen	
	Klass. 1)	Anzahl	%	Anzahl	%
1	1	1'270	3.67	1'270	3.67
2	1	1'576	4.56	1'576	4.56
3	1	85	0.25	85	0.25
4	1	635	1.84	354	1.02
5	1	622	1.80	483	1.40
6	1	1'796	5.20	133	0.38
7	2	1'411	4.08	43	0.12
8	1	190	0.55	180	0.52
9	1	440	1.27	440	1.27
10	2	825	2.39	417	1.21
11	2	258	0.75	171	0.49
12	2	11	0.03	11	0.03
13	2	56	0.16	37	0.03
14	1	1	0	1	0
15	1	239	0.69	229	0.66
16	1	146	0.42	146	0.42
17	1	443	1.28	441	1.28
18	2	1	0	0	0
19	2	5	0.01	5	0.01
20	2	315	0.91	315	0.91
21	2	7	0.02	2	0.01
22	2	1'282	3.71	1'282	3.71
23	2	1'723	4.99	1'723	4.99
24	2	3'486	10.08	3'486	10.08
25	2	524	1.52	524	1.52
26	2	1'813	5.25	1'813	5.25
27	2	1'584	4.58	1'574	4.55
28	2	3'118	9.02	3'118	9.02
29	2	95	0.27	95	0.27
30	2	1'375	3.98	1'375	3.98
31	2	454	1.31	454	1.31
32	2	1'921	5.56	1'921	5.56
33	2	1'987	5.75	1'987	5.75
34	2	47	0.14	47	0.14
35	2	454	1.31	454	1.31
36	2	579	1.68	579	1.68
37	2	603	1.74	601	1.74
38	2	1'994	5.77	1'994	5.77
39	2	1'647	4.77	1'647	4.77
40	2	387	1.12	387	1.12
41	2	423	1.22	423	1.22
42	2	58	0.17	58	0.17
				Leere	779
				Mehr- fach klass.	2'105
					2.25
					6.09

Tab. 9: Ergebnisse der Merge-Klassifikation

- 1) 1=stammen aus der 12 Kat.-MCLAS-Klass. mit 3 Kanälen
2=stammen aus der 30 Kat.-MCLAS-Klass. mit 6 Kanälen

5. Kanalselektion

Nachdem beim DCLAS und MCLAS die Bezugsklassifikationen erarbeitet werden konnten, wurde das Problem einer Kanalreduktion an die Hand genommen.

Das in die IBIS-Programmbibliothek aufgenommene Kanalselektionsprogramm führt eine schrittweise Diskriminanzanalyse durch. Dieses Verfahren erlaubt es, diejenigen Kanäle auszuwählen, die kombiniert eine möglichst gute Trennbarkeit aller Gruppen voneinander ermöglichen, bzw. Kanäle auszuscheiden, die auf die Trennbarkeit von Gruppen keinen oder gar einen negativen Einfluss ausüben. Bezüglich der theoretischen Grundlagen der angewandten Methoden wird auf COOLEY + LOHNES (1971), RAO (1962) und DIXON (1970) verwiesen. Im folgenden Kapitel werden nur die für das Verständnis des Kanalselektionsprogrammes notwendigen Angaben gemacht.

5.1 Ablauf des Kanalselektionsverfahrens

Es gliedert sich in die vier folgenden Programmschritte:

1. Berechnung (F-Wert) der Testgrößen für jede einzelne Variable:

$$F_j = \frac{a_{jj} - b_{jj}}{b_{jj}} = \frac{\frac{1 - 1}{w_{jj} t_{jj}}}{\frac{1}{t_{jj}}} = \frac{(t_{jj} - w_{jj}) t_{jj}}{w_{jj} \cdot t_{jj}} = \frac{z_{jj}}{w_{jj}}$$

$W = \{w_{ij}\}$: Binnenkreuzprodukte
 $Z = \{z_{ij}\}$: Zwischenkreuzprodukte
 $T = \{t_{ij}\}$: Totale Kreuzprodukte

2. Auswahl der ersten Variablen (Kanal) mit dem grössten F-Wert (beste Trennbarkeit der Gruppen).
3. Berechnung der neuen Matrizen A und B (siehe DIXON, 1970, Programm BMD07M), der neuen F-Werte und anderen Testgrößen (Rao's F-Approximation, Wilk's Lambda).

Erläuterung:

$$\begin{aligned} \text{aus } W &= \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \quad \text{und } T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} : \\ A &= \begin{bmatrix} W_{11}^{-1} & W_{11}^{-1}W_{12} \\ W_{21} & W_{11}^{-1}W_{22}-W_{21}W_{11}^{-1}W_{12} \end{bmatrix} = \{a_{ij}\} \\ B &= \begin{bmatrix} T_{11}^{-1} & T_{11}^{-1}T_{12} \\ T_{21} & T_{11}^{-1}T_{22}-T_{21}T_{11}^{-1}T_{12} \end{bmatrix} = \{b_{ij}\} \end{aligned}$$

Der F-Wert für jede Variable heisst:

a) sofern Variable j in die Analyse einbezogen wird:

$$F_j = \frac{a_{jj} - b_{jj}}{b_{jj}} \cdot \frac{n - r - g + 1}{g - 1}$$

a_{jj} bzw. b_{jj} sind die diagonalen Elemente der Matrize $A = \{a_{ij}\}$ und $B = \{b_{ij}\}$

n = totale Anzahl Stichprobenelemente über alle Kategorien

g = Anzahl Kategorien, die in der Analyse verwendet werden

r = momentane Anzahl Kanäle, die beim schrittweisen Vorgehen in die Analyse einbezogen werden

b) sofern Variable j nicht einbezogen wird:

$$F_j = \frac{b_{jj} - a_{jj}}{a_{jj}} \cdot \frac{n - r - g}{g - 1}$$

mit Freiheitsgraden $g - 1$ und $n - g - r$.

Mit der Berechnung der neuen F-Werte wird einerseits eine Beurteilung der Qualität der einzelnen Kanäle erreicht, andererseits für die nicht einbezogenen Kanäle der Beitrag berechnet, den sie zur Verbesserung der Trennbarkeit leisten könnten.

Da üblicherweise alle Variablen korreliert sind, ändern sich diese F-Werte von Schritt zu Schritt mit Einbezug einer neuen Variablen. Wilk's Lambda und Rao's F-Approximation sind Testgrössen, die die Trennbarkeit der Gruppen durch die Gesamtheit der bereits ausgewählten Kanäle zu beurteilen vermögen.

$$\text{Wilk's } \Lambda = \text{Det } (W_{11}) / \text{Det } (T_{11})$$

mit Freiheitsgraden $r, g-1, n-g$

$$\text{Rao's } F = \frac{1 - \Lambda^{1/s}}{\Lambda^{1/s}} \cdot \frac{ms + 1 - rq/2}{r \cdot q}$$

$$\text{wobei: } s = \sqrt{\frac{r^2 q^2 - 4}{r^2 q^2 - 5}}, \quad \text{wenn } r^2 + q^2 \neq 5$$

$$s = 1, \quad \text{wenn } r^2 + q^2 = 5$$

$$m = n - \frac{r + q + 3}{2}$$

$$q = g - 1$$

4. Derjenige Kanal mit dem grössten F-Wert der nicht einbezogenen Kanäle wird in jedem Schritt separiert und in die gesamthafte Analyse einbezogen. Anschliessend wird wieder zu Punkt 3 zurückgegangen, wo die Berechnungen von neuem aufgenommen werden. Dieser Prozess wird wiederholt, bis alle Variablen ausgewählt oder weitere Variablen (Kanäle) keinen zusätzlichen Gewinn für die Trennbarkeit der Gruppen mehr bringen. Gegenwärtig sind im Programm keine Abbruchkriterien enthalten. Die Beurteilung, nach welchem Schritt abgebrochen werden soll, ist dem Benützer überlassen.

5.2 Vorgehen

Als Grundlage für die schrittweise Diskriminanzanalyse wird dieselbe Statistik benutzt, wie sie für den MCLAS-Algorithmus verwendet wird. Das Programm rechnet dann so viele Schritte durch, wie Kanäle eingegeben werden. In Tab. 10 ist die Rangfolge der Kanäle aufgezeichnet, wie sie mit 42 Kategorien und 12 Kanälen entstand.

Rang- folge	Kanal	Wellenlängen- bereich in μm	F-Werte
1.	6	0.68 - 0.76	14'658.20
2.	11	1.55 - 1.75	3'391.84
3.	2	0.46 - 0.51	1'594.96
4.	7	0.78 - 0.88	1'048.43
5.	13	10.20 - 12.50	814.60
6.	4	0.56 - 0.61	532.37
7.	9	1.09 - 1.19	248.60
8.	5	0.62 - 0.67	152.49
9.	3	0.52 - 0.56	120.51
10.	10	1.20 - 1.30	67.79
11.	12	2.10 - 2.35	38.83
12.	8	0.98 - 1.08	28.42

Tab. 10: Ergebnisse der Kanalselektion mit 42 Kategorien und 12 Kanälen

Wie schon im theoretischen Teil erwähnt, liegt es am Benutzer, die notwendige Anzahl Kanäle für eine gute Klassifikation herauszufinden. Er muss in der oben aufgezeichneten Rangfolge die kritische Grenze finden, bei der ein Kanal gerade noch einen signifikanten Beitrag an die Klassifikation liefern kann.

Mit Stichprobenklassifikationen wurde dieser Zielsetzung entsprochen. Sowohl mit dem DCLAS als auch mit dem MCLAS wurde eine Serie von Klassifikationen durchgeführt, wobei nach jedem Durchgang derjenige Kanal ausgeschieden wurde, der zur Trennung der Kategorien den kleinsten Beitrag lieferte.

Tab. 11 und 12 geben eine Uebersicht über die Resultate der DCLAS- und MCLAS-Stichprobenklassifikationen, wobei nur die für diese Arbeit relevanten "Schnee-Eis"-Kategorien aufgeführt werden. Da uns in diesem Zusammenhang einzig der kritische Kanalzahlenbereich interessiert, bei dem eine signifikante Verschlechterung der Resultate zu erwarten ist, wurde auf die Darstellung der guten Ergebnisse von neun und mehr Kanälen verzichtet.

Kat. Nr.	8 Kanäle				7 Kanäle			
	1 %	2 %	3 %	4 %	1 %	2 %	3 %	4 %
1	100				100			
2	97.7	2.3			97.7	2.3		
3	100				100			
4	100				100			
5	100				100			
6	98.9	1.1			97.8	2.2		
7	98.4	1.6			96.9	1.6	1.5	
8	100				100			
9	100				100			
10	92.1	4.6	3.3	0.7	90.9	5.7	3.4	
11	98.9		1.1		98.9		1.1	
12	100			0.6	100			
13	99.2	0.8		0.7	98.5	1.5		4.2

Kat. Nr.	6 Kanäle				5 Kanäle			
	1 %	2 %	3 %	4 %	1 %	2 %	3 %	4 %
1	100				100			
2	76	24			76	24		
3	100				100			
4	100				90.6	9.4		
5	100				89.1	10.9		1.4
6	96.7	1.1	2.2		82.5	17.5		
7	96.9	1.6	1.5		89.1	9.4	1.5	
8	100				100			
9	100				100			
10	88.6	6.8	4.6	1.3	63.6	29.5	6.9	
11	96.6	2.3	1.1		79.6	10.2	10.2	2.9
12	100				100			
13	98.5	1.5		4.3	89.2	1.6	9.2	4.2

Kat. Nr.	4 Kanäle			
	1 %	2 %	3 %	4 %
1	100			
2	75.4	24.6		
3	100			
4	88.7	11.3		
5	87.3	12.7		
6	82.5	17.5		
7	85.9	12.5	1.6	
8	100			
9	100			
10	68.2	21.6	10.2	2.8
11	71.6	12.5	15.9	8.7
12	84		16	18.9
13	90.7	0.6	8.5	7.3

Legende:

- 1 = richtig klassiert
- 2 = "Fehler" innerhalb der eigenen Hauptkategorie
- 3 = effektive Fehlzuordnungen in die Hauptkategorie "schneefreie Zone"
- 4 = Fehlzuordnungen von der Hauptkategorie "schneefreie Zone" in die Hauptkategorie "Schnee-Eis"

Tab. 11: Ergebnisse der DCLAS-Stichprobenklassifikation, beginnend mit 8 Kanälen, in absteigender Reihenfolge bis 4 Kanäle. Es werden nur die für diese Arbeit relevanten Schnee-Eis-Kategorien aufgeführt.

Kat. Nr.	8 Kanäle				7 Kanäle			
	1 %	2 %	3 %	4 %	1 %	2 %	3 %	4 %
1	98.3	1.2	0.5		97.7	1.2	1.1	
2	98.3	0.6	1.1		98.3	1.1	0.6	
3	93.7	4.8	1.5		93.7	4.0	2.3	
4	100				100			
5	100				100			
6	99.5	0.5			98.9	0.6	0.6	
7	100				100			
8	100				100			
9	100			0.8	100			0.8
10	93.2	5.7	1.1	0.4	95.5	4.5		0.4
11	97.7	2.3			97.7	2.3		
12	100				100			
13	99.2	0.8			99.2	0.8		

Kat. Nr.	6 Kanäle				5 Kanäle			
	1 %	2 %	3 %	4 %	1 %	2 %	3 %	4 %
1	97.7	1.7	0.6		97.7	2.3		
2	91.0	8.4	0.6		86	13.5	0.5	
3	95.2	3.2	1.6		93.7	4.8	1.5	
4	100				94.3	5.7		
5	96.4	3.6			90.9	9.1		
6	98.9	0.6	0.5		92.9	6.6	0.5	
7	100				95.3	4.7		
8	100				100			
9	100			0.8	100			0.8
10	96.6	3.4		1.4	78	20.9	1.1	2.9
11	97.7	2.3			86.4	9.1	4.5	2.9
12	100				96		4	
13	99.2	0.8			93.8	3.2	3.0	2.9

Kat. Nr.	4 Kanäle			
	1 %	2 %	3 %	4 %
1	97.7	2.3		
2	88.8	9.6	0.6	
3	95.2	3.2	1.6	
4	94.3	5.7		
5	87.3	12.7		
6	92.9	6.7	0.4	
7	96.9	3.1		
8	100			
9	100			0.8
10	72.7	22.7	4.6	0.6
11	84.1	6.8	9.1	4.3
12	96		4	8.8
13	96.9	1.6	1.5	7.1

Legende:

- 1 = richtig klassiert
- 2 = "Fehler" innerhalb der eigenen Hauptkategorie
- 3 = effektive Fehlzuordnungen in die Hauptkategorie "schneefreie Zone"
- 4 = Fehlzuordnungen von der Hauptkategorie "schneefreie Zone" in die Hauptkategorie "Schnee-Eis"

Tab. 12: Ergebnisse der MCLAS-Stichprobenklassifikation, beginnend mit 8 Kanälen, in absteigender Folge bis 4 Kanäle. Es werden nur die für diese Arbeit relevanten Schnee-Eis-Kategorien aufgeführt.

Für die Qualität einer Klassifikation spielt es keine Rolle, wenn bei reduzierter Kanalauswahl Fehlklassierungen innerhalb der Hauptkategorien vorkommen (Bsp. DCLAS 6 Kanäle: Die 24 % Fehlklassierungen der Kategorie 2 werden alle der verwandten Kategorie 3 zugeordnet). Erst wenn grössere Fehlzuordnungen von einer Hauptkategorie in die andere auftreten, ist die kritische Grenze der Kanalzahl erreicht.

Die Betrachtung der Resultate der Stichprobenklassifikation beider Algorithmen (Tab. 11 und 12) lässt ersehen, dass bei Verwendung der 6 besten Kanäle mit guten Klassifikationsergebnissen gerechnet werden kann. Bei der Benützung von nur 5 Kanälen hingegen nimmt die Fehlerhäufigkeit beträchtlich zu.

Bezogen auf die Fehlerhäufigkeit bei 6 Kanälen ist bei der Verwendung von nur 5 Kanälen beim MCLAS eine Vergrösserung des Fehlers um das 4.5-fache, beim DCLAS um das 3-fache zu beobachten. Beim DCLAS wächst der Fehler bei einzelnen Kategorien auf rund 10 % an, was die Toleranzgrenze für eine qualitativ genügende Klassifikation überschreitet. (Wenn der Fehler bei den ausgesuchten "einheitlichen" Stichproben schon 10 % beträgt, wird er bei der Klassifikation eines grossräumigen Untersuchungsgebietes noch mehr anwachsen, weil die Pixel einer Kategorie über grössere Regionen hinweg durch mannigfache Einflüsse modifiziert werden und deshalb stärker streuen).

Beim MCLAS liegt der maximale Fehler, der bei einzelnen Kategorien auftritt, unter 5 %, so dass anhand von Klassifikationen im Testgebiet erst noch geprüft werden muss, inwieweit sich diese Fehlzuordnungen negativ auswirken.

5.3 Klassifikationen mit reduzierter Kanalzahl

Mit Hilfe des Kanalselektionsprogrammes und der Stichprobenklassifikation konnte die für diese Untersuchung kritische Grenze der Kanalzahl gefunden werden (Kap. 5.2). Anhand der Klassifikationen des Testgebietes müssen diese Ergebnisse jetzt überprüft werden. Tab. 13 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Abweichungen gegenüber der ursprünglichen 8 (MCLAS)- resp. 12 (DCLAS)-Kanal-Klassifikation werden in der zweiten Kolonne festgehalten.

Werden die Flächenanteile aller Schneekategorien gleich 100 % gesetzt, liegen die Gesamtabweichungen gegenüber den Ausgangsklassifikationen alle unter 5 %. Mit gebührender Vorsicht (Kap. E.12) dürfen die Resultate in Tab. 13 so interpretiert werden, dass mit reduzierter Kanalzahl sowohl mit dem MCLAS als auch mit dem DCLAS, bezogen auf die Bezugsklassifikation, gute Ergebnisse erzielt werden können. Erstaunlicherweise weicht das Ergebnis der MCLAS-Klassifikation mit 5 Kanälen nur wenig von der 6-Kanal-Klassifikation ab. Ein Grund für dieses positive Resultat liegt darin, dass diejenigen Kategorien, die in der Stichprobenklassifikation mit 5 Kanälen einen grossen Fehleranstieg zu verzeichnen hatten (Kategorien 11, 12, 13) prozentual im Testgebiet (wie sich später zeigte auch im grossräumigen Untersuchungsgebiet, siehe Kap. E.12) nur gering vertreten sind und dadurch das Gesamtergebnis wenig beeinflussen konnten.

Die Resultate dieses Kapitels zeigen auf, dass es für Schneekartierungen völlig unnötig ist, mit mehr als 6 Kanälen zu arbeiten, weil dadurch die Qualität einer Klassifikation nicht verbessert wird, die Verarbeitungskosten dagegen stark erhöht werden. Aus diesem Grunde wird im nachfolgenden Teil dieser Arbeit vorwiegend mit 6 resp. 5 Kanälen (siehe Kap. E.6.4.2) weitergearbeitet.

Haupt-Kat.	Kat. Nr.	MCLAS 6 Kanäle		MCLAS 5 Kanäle		DCLAS 6 Kanäle	
		%	Δ	%	Δ	%	Δ
Schnee-Eis	1	4.30	- 0.18	4.63	+ 0.15	4.72	+ 0.24
	2	3.42	+ 0.29	3.29	+ 0.16	3.02	- 0.35
	3	0.11	- 0.03	0.15	+ 0.01	0.21	- 0.09
	4	2.25	- 0.15	1.77	- 0.62	2.28	- 0.05
	5	1.58	+ 0.42	1.22	+ 0.06	0.98	+ 0.07
	6	1.81	- 0.11	1.98	+ 0.06	1.67	- 0.23
	7	1.90	- 0.33	2.61	+ 0.38	2.34	+ 0.02
	8	0.59	+ 0.23	0.41	+ 0.05	1.27	+ 0.66
	9	0.78	- 0.36	1.62	+ 0.48	1.03	- 0.34
	10	2.09	+ 0.09	2.01	+ 0.01	2.05	+ 0.06
	11	0.47	- 0.12	0.49	- 0.10	0.81	+ 0.19
	12	0.03	-	0.10	- 0.07	0.04	- 0.01
	13	0.11	- 0.03	0.17	+ 0.03	0.25	- 0.02

schneefreie Zone	14	0	-	0	-	0	-
	15	0.23	+ 0.06	0.15	- 0.02	0.67	- 0.19
	16	0.98	- 0.07	1.01	- 0.04	0.78	- 0.02
	17	0.53	- 0.26	0.93	+ 0.14	0.58	- 0.32
	18	0	-	0	-	0	-
	19	0.01	-	0.13	+ 0.12	0	- 0.02
	20	0.48	- 0.12	1.24	+ 0.64	0.1	- 1.15
	21	0.02	- 0.01	0.02	- 0.01	0.1	- 0.02
	22	3.70	+ 0.64	3.47	+ 0.41	3.49	- 1.18
	23	3.79	- 1.03	4.02	- 0.80	7.78	- 0.49
	24	8.78	- 1.24	8.99	- 1.03	11.12	+ 1.85
	25	1.41	- 0.27	1.98	+ 0.30	2.53	+ 0.07
	26	5.91	- 1.08	6.32	- 0.67	7.72	+ 2.12
	27	4.71	+ 0.38	4.61	+ 0.28	2.09	- 0.42
	28	11.28	+ 3.45	8.35	+ 0.52	10.52	- 1.71
	29	0.03	- 0.16	0.54	+ 0.35	0.01	+ 0.01
	30	4.18	- 0.66	4.84	-	0.81	+ 0.71
	31	0.97	- 0.16	0.80	- 0.33	2.69	+ 1.05
	32	5.96	+ 0.39	5.52	- 0.05	5.96	- 0.36
	33	3.88	- 1.17	4.93	- 0.12	6.22	+ 1.35
	34	0.08	+ 0.01	0.11	+ 0.04	0.14	+ 0.02
	35	1.81	+ 0.01	2.12	+ 0.32	1.72	+ 0.41
	36	1.32	- 0.31	1.49	- 0.14	1.54	+ 0.01
	37	1.92	+ 0.13	1.96	- 0.09	1.45	- 0.25
	38	7.84	+ 0.55	6.83	- 0.46	6.37	+ 0.68
	39	5.44	+ 0.71	5.52	+ 0.79	0.78	- 3.45
	40	1.44	+ 0.23	1.37	+ 0.16	1.89	+ 0.36
	41	2.00	+ 0.10	1.80	- 0.10	0.89	- 0.14
	42	0.67	+ 0.13	0.49	- 0.05	0.58	+ 0.04

Tab. 13: Ergebnisse der Klassifikationen mit reduzierter Kanalzahl: MCLAS-Algorithmus mit 6 resp. 5 Kanälen, DCLAS-Algorithmus mit 6 Kanälen. In Kolonne Δ sind die Abweichungen dieser Klassifikationsergebnisse gegenüber den Ursprungsklassifikationen angegeben.

6. Kategorienreduktion

In einem zweiten Schritt soll nun auch die hohe Zahl von Kategorien nach Möglichkeit erniedrigt werden. Es muss hier nochmals betont werden, dass in dieser Untersuchung nur die Schneeeis-Kategorien von Bedeutung sind (Kap. E.2). Die anderen Kategorien bezwecken einzig, die Schneeflächen sorgfältig abzugrenzen. Ob es sich dabei um reine Kategorien (Bsp. Felsen), Mischkategorien (Bsp. Wasserrand) oder gar "künstlich" geschaffene Kategorien (Zusammenfassung einer Anzahl reiner Kategorien) handelt, spielt keine Rolle. Sie müssen lediglich eine gute Separierung der schneefreien Gebiete gegenüber den Schneezonen garantieren.

Bei einer Kategorienreduktion geht es also darum, die "schneefreien" Kategorien auf allfällige Eliminierungsmöglichkeiten zu untersuchen.

Umgekehrt besteht kein Interesse, auch die Schneekategorien zu reduzieren, weil es während der Schneeschmelzperiode wichtig ist, die verschiedenen Schneezustände zu kennen (vor allem der Unterschied Nassschnee - trockener Schnee). Eine Elimination könnte folglich den Verlust von wichtiger Information über den momentanen Zustand der zu untersuchenden Schneefläche bedeuten.

6.1 Vorgehen

Es wurden zwei Verfahren der Kategorien-Reduktion in Betracht gezogen, wobei die Genauigkeit des Klassifikationsergebnisses nicht wesentlich vermindert werden darf:

1. Vergleich von Kategorien mit F-Tests
2. Abstandsvergleiche der Kategorien mit Distanztabelle

6.1.1 Vergleich von Kategorien mit F-Tests

Mit Kategorien, die in allen sechs ausgewählten Kanälen ähnliche Mittelwerte aufweisen, wurde mit dem Kanalselektionsprogramm eine F-Wert-Berechnung durchgeführt. Diese Werte wurden dann mit den oberen Signifikanzschranken der F-Verteilung für $P = 0.05$ in Tabellen verglichen.

Das Resultat fiel ernüchternd aus. Kein einziges Kategorienpaar liegt so nahe beieinander, dass man die H_0 -Hypothese (der Unterschied zwischen den beiden Kollektiven ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % von zufälliger Natur) akzeptieren könnte. Selbst bei einem Signifikanzniveau von 10 % musste die Nullhypothese verworfen werden. Alle Kategorien liegen also so weit auseinander, dass sie mit einem F-Test nicht zusammengefasst werden können. Das Verfahren musste deshalb als eine Möglichkeit zur Kategorienreduktion fallen gelassen werden.

6.1.2 Abstandsvergleich der Kategorien mit Distanztabelle

Hier bildet eine Distanztabelle, die die Abstände der Mittelwerte der Kategorien zueinander im n-dimensionalen Merkmalsraum wiedergibt, die Grundlage zur Reduktion von Kategorien. Die Distanztabelle lässt überblicken, welche Kategorienmittelwerte sehr nahe beieinander liegen und deshalb für eine Kategorienreduktion in Frage kommen.

Fig. 19 zeigt in einer zweidimensionalen Darstellung die Idee, die der Kategorienreduktion zugrunde liegt: Neben den Schneekategorien müssen nur diejenigen "schneefreien" Kategorien für das Klassifikationsverfahren berücksichtigt werden, die im Merkmalsraum unmittelbar an die Schneekategorien angrenzen. Alle anderen, weiter entfernt liegenden "schneefreien" Kategorien können eliminiert werden, weil sie zur Abgrenzung der Schneefläche nichts beitragen.

Diese Zusammenhänge werden in Fig. 20 und der dazugehörigen Tab. 14 an einem praktischen Beispiel erläutert. Kategorie A ist eine Schneekategorie, die Kategorien B, C, D und E gehören zur Hauptkategorie "schneefreie Zone". Die Distanztabelle und die Figur zeigen deutlich, dass die Kategorien C und D ohne Bedenken, Kategorie B unter Umständen (nach Ueberprüfung mit Testklassifikationen) ausgeschieden werden können.

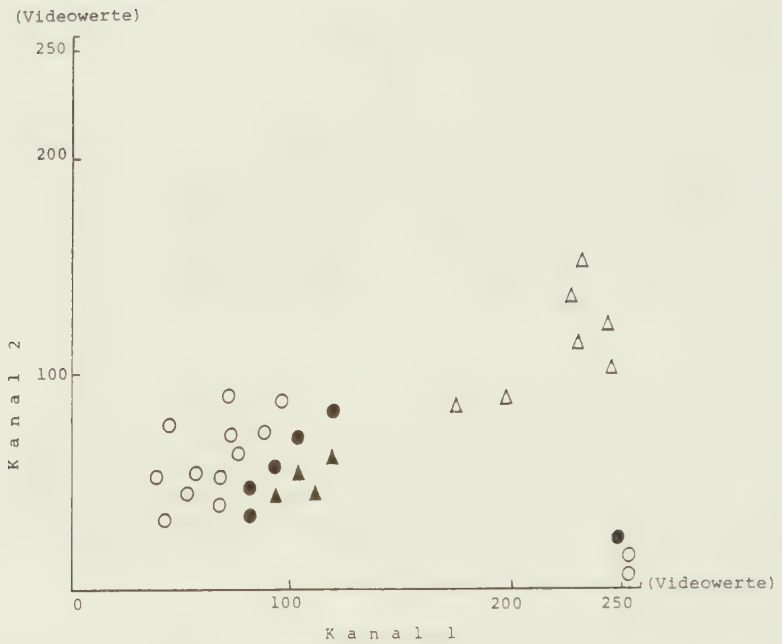


Fig. 19: Prinzip der Kategorienreduktion

Legende:

- ▲ = Stichproben einer Schnee-Schatten-Kategorie
- Δ = Stichproben einer Schnee-Sonne-Kategorie
- = Stichproben einer schneefreien Kategorie, die eliminiert werden können
- = Stichproben von schneefreien Kategorien, die zur Abgrenzung benötigt werden

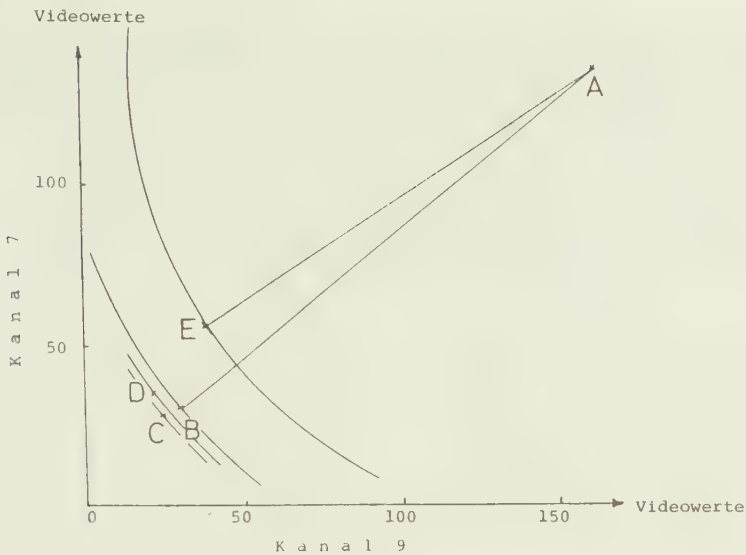


Fig. 20: Praktisches Beispiel einer Kategorienreduktion im zweidimensionalen Raum

Legende:

A = Schnee-Kategorien (Mittelwert) ¹⁾
 B,C,D,E = Kategorien der "schneefreien Zone"

	A	B	C	D	E
A	0				
B	<u>169.34</u>	0			
C	<u>174.53</u>	5.44	0		
D	<u>172.47</u>	9.04	7.24	0	
E	147.50	27.13	30.80	26.32	0

Tab. 14: Distanzwerte zwischen den fünf oben genannten Kategorien-Mittelwerten

Legende:

———— = Kategorien, die eliminiert werden können ¹⁾
 ----- = Kategorien, die u.U. weggelassen werden können

1) Erläuterungen siehe Text

In der Praxis wurden in einem ersten Reduktionsverfahren von nahe zusammenliegenden Kategorienpaaren oder sogar -gruppen jene Kategorien ausgeschieden, deren Distanzwerte durchgehend grösser sind als die ihrer Kontrahenden. Tab. 15 zeigt anhand eines Ausschnittes aus der Distanztabelle, warum die aus der Hauptkategorie "schneefreie Zone" stammenden Kategorien 22, 31, 32 und 35 eliminiert werden können. Ihre Distanzwerte zu den in der Senkrechten stehenden Schnee-Eis-Kategorien sind durchgehend grösser als die der Kategorien 23, 33 und 38.

		Kategorien der Hauptkategorie "schneefreie Zone"						
		*22	23	*31	*32	33	*35	38
Kat. der Hauptkat. "Schnee-Eis"	1	389.9	370.1	382.4	402.0	384.1	400.9	376.2
	2	422.3	401.1	417.3	436.3	420.1	435.4	409.4
	3	428.7	407.3	424.1	443.1	427.1	442.3	415.7
	4	230.3	212.5	220.5	239.9	220.4	239.5	217.0
	5	216.9	197.5	210.9	227.9	210.7	225.6	201.9
	6	150.3	133.8	142.7	158.7	140.6	157.1	136.6
	7	190.5	177.5	174.6	200.3	171.6	191.5	167.3
	8	293.4	275.8	282.4	302.4	282.7	302.8	280.3
	9	346.0	328.8	335.3	355.6	336.0	355.5	333.4
	10	85.2	82.4	79.6	81.3	65.8	79.3	77.2
	11	99.7	98.9	91.0	93.4	76.6	93.1	93.6
	12	80.2	89.9	94.1	88.7	79.2	87.6	78.6
	13	73.5	74.6	79.2	67.5	63.9	69.0	65.3

Tab. 15: Distanzwerte zwischen den 13 Schnee-Eis-Kategorien und sieben eliminationsverdächtigen Kategorien aus der Hauptkategorie "schneefreie Zone"

Legende:

- Kategorien mit den minimalsten Abständen zu der jeweiligen Schnee-Eis-Kategorie
- * Kategorien aus der "schneefreien Zone", die eliminiert werden können

Mühe los gelang es so, im ersten Durchgang von den 29 "schneefreien" Kategorien deren elf aus dem Verfahren auszuscheiden. Die anschliessende Kontrollklassifikation, die Auskunft geben sollte, ob sich die Resultate gegenüber der Ursprungsklassifikation verschlechtert haben, ergab eine vernachlässigbare Abweichung (Fehler ≤ 0.04 %).

Im zweiten Durchgang wurden auch jene "schneefreien" Kategorien ins Reduktionsverfahren einbezogen, die zu den übrigen "schneefreien" Kategorien einen relativ grossen Abstand haben. Dieser Abstand ist aber im Verhältnis zur Distanz, den diese Kategorien zu den Schneekategorien aufweisen, immer noch klein.

Um den Einfluss gewisser Kategorien auf die Schneeklassifikation überprüfen zu können, wurden regelmässig Testklassifikationen durchgeführt. Bei zwei Kategorien (20 und 37) zeigte sich dann auch, dass eine Elimination nicht gerechtfertigt war, weil sich das Klassifikationsergebnis signifikant verschlechterte. Dennoch gelang es mit dieser Methode, die "schneefreien" Kategorien auf elf zu reduzieren. Innerhalb der Hauptkategorie "Schnee-Eis" konnte die Kategorie 3 (Schnee trocken, SO, steile Hanglage) in die Kategorie 2 (Schnee trocken, SO, Hanglage $> 30^\circ$) einbezogen werden. Da es sich bei beiden Kategorien um denselben Schneetyp handelt, bleiben die "Schnee-Eis"-Kategorien auch nach dem Reduktionsverfahren noch genau definiert.

In der endgültigen Klassifikation müssen folglich noch 23 Kategorien berücksichtigt werden. Die Reduktion der "schneefreien" Kategorien von 29 auf 11 entspricht einer Abnahme von 62 %. Weil jede im Klassifikationsverfahren verbliebene "schneefreie" Kategorie auch andere, eliminierte Kategorien repräsentiert, haben jetzt nur noch die Kategorien der Hauptkategorie "Schnee-Eis" einen Realitätsbezug. Die restlichen, zur Hauptkategorie "schneefreie Zone" gehörenden "Kategorien" dienen lediglich der Abgrenzung der Schneefläche. Ihre Ausdehnung auf dem klassifizierten Bild entspricht nicht mehr der Wirklichkeit. So nimmt z.B. in den nachfolgenden Klassifikationen die Kategorie "Wiese" auch Flächenanteile von Wald und Rasen ein. Deshalb werden die verbliebenen "schneefreien" Kategorien jetzt als "Sammelkategorien" bezeichnet und dem Alphabet nach geordnet (Tab. 16). Da bei Klassifikationen mit reduzierter Kategorienzahl z.T. "schneefreie" Gebiete nicht mehr klassiert werden (liegen ausserhalb der eingegebenen Schranken), wurde die Hauptkategorie "schneefreie Zone" bei der graphischen Darstellung der Klassifikationsergebnisse einfach als weisse Fläche wiedergegeben (siehe z.B. Abb. 2).

Im folgenden wird primär diese Konfiguration aus 12 "Schnee-Eis"-Kategorien und 11 Sammelkategorien der Hauptkategorie "schneefreie Zone" verwendet. Zur Vereinfachung und besseren Kennzeichnung werden darum die 23 Kategorien und Sammelkategorien als "Klassen" bezeichnet (siehe z.B. Tab. 18).

Hauptkategorie "Schnee - Eis"		
Klassen Nr.	urspr. Nr.	Bezeichnung
1	1	Schnee trocken SO, flache Hanglage
2	2	Schnee trocken SO, Hanglage $> 30^{\circ}$
3	4	Schnee am oberen Rand von Gefällbrüchen ¹⁾
4	5	Uebergangszone Schneezone-Gefällsteilen, z.T. schon Eis hervortretend, SO
5	6	Gefällbrüche unterer Teil, hauptsächlich Eis, das z.T. stark verschmutzt ist, SO
7	8	Gletschereis 1, SO
8	9	Gletschereis 2, SO
9	10	sehr schmutziges Eis am Ende einer Gletscherzunge sowie Schneezone mit Ausaperungsstellen in Steilwänden am Schatten
10	11	Schnee trocken 1, SA
11	12	Schnee trocken 2, SA
12	13	Schnee-Eiszone, SA

Hauptkategorie "schneefreie Zone"	
13	Sammelkategorie A
14	Sammelkategorie B
15	Sammelkategorie C
16	Sammelkategorie D
17	Sammelkategorie E
18	Sammelkategorie F
19	Sammelkategorie G
20	Sammelkategorie H
21	Sammelkategorie I
22	Sammelkategorie K
23	Sammelkategorie L

Tab. 16: Klasseneinteilung nach der Kategorienreduktion

Legende: SO = Sonnenlage
SA = Schattenlage

1) Terminologie nach WILHELM, 1975

6.2 Kanalselektion mit reduzierter Kategorienzahl

Nachdem die Kategorienzahl reduziert werden konnte, musste zur Kontrolle noch einmal eine Kanalselektion mit allen zwölf Kanälen und reduzierter Kategorienzahl durchgeführt werden.

Ausser einer Umkehrung der Rangfolge der Kanäle 4 und 13 an 5. resp. 6. Stelle blieb die Reihenfolge der sechs aussagekräftigsten Kanäle im Vergleich zum Kanalselektionsverfahren mit 42 Kategorien gleich. Tab. 17 zeigt das Ergebnis.

Rang- folge	42 Kategorien		23 Klassen	
	Kanal	Wellenlängen- bereich in μm	Kanal	Wellenlängen- bereich in μm
1.	6	0.68 - 0.76	6	0.68 - 0.76
2.	11	1.55 - 1.75	11	1.55 - 1.75
3.	2	0.46 - 0.51	2	0.46 - 0.51
4.	7	0.78 - 0.88	7	0.78 - 0.88
5.	13	10.20 - 12.50	4	0.56 - 0.61
6.	4	0.56 - 0.61	13	10.20 - 12.50
7.	9	1.09 - 1.19	5	0.62 - 0.67
8.	5	0.62 - 0.67	3	0.52 - 0.56
9.	3	0.52 - 0.56	9	1.09 - 1.19
10.	10	1.20 - 1.30	8	0.98 - 1.08
11.	12	2.10 - 2.35	10	1.20 - 1.30
12.	8	0.98 - 1.08	12	2.10 - 2.35

Tab. 17: Vergleich der Rangfolge der Kanalselektionsverfahren mit 42 Kategorien und 23 Klassen

6.3 Probleme des thermalen Infrarotbereiches

Das Zurückfallen des 13. Kanales (Thermalkanal) an die 6. Stelle (Tab. 17) ist für das weitere Vorgehen dieser Arbeit von Bedeutung. Die Einbeziehung des Thermalkanales (Bandbereich 10.2 - 12.5 μm) war in dieser Untersuchung immer unter grossem Vorbehalt vorgenommen worden (Kap. B.3.3).

ITTEN (1973) beschreibt die komplexen physikalischen Umgebungseinflüsse auf die Infrarot-Strahlung eines Objektes. Auszugsweise seien hier die wichtigsten Punkte erwähnt:

- Die Strahlungsintensität eines Objektes im thermalen Spektralbereich setzt sich grundsätzlich aus den zwei unbekannten Grössen, dem Emissionsfaktor ϵ und der absoluten Temperatur des Objektes zusammen. Da diese Grössen während eines Satellitenüberfluges im Testgebiet mit unseren technischen Möglichkeiten nicht umfassend gemessen werden können, muss bei der Verarbeitung der Daten des thermalen Kanales ein Fragezeichen gesetzt werden.
- Wegen der grossen, spektralen Variationen in diesem relativ breiten Spektralbereich ist es fragwürdig, ob genaue Abgrenzungen zwischen verschiedenen Kategorien vorgenommen werden können (SKYLAB EARTH RESOURCES DATA CATALOG, 1974).
- Das Testgebiet ist extrem gebirgig, d.h. es ist durch grosse Höhenunterschiede gekennzeichnet. Diese Höhenunterschiede verfälschen das Temperaturbild wesentlich.
- Das extrem starke Relief bewirkt auch entsprechend verschiedene Hangneigungen und Expositionen, so dass gleiche Kategorien je nach Winkel zur Sonne anders aufgewärmt werden.
- Zusätzlich wirken ebenfalls auf die Strahlungsintensität eines Untersuchungsobjektes ein:
 - * Lufttemperatur
 - * Luftfeuchtigkeit
 - * Luftdruck
 - * Windgeschwindigkeit und Windrichtung
 - * Niederschlagsverhalten vor und während der Aufnahme
 - * Tageszeit
 - * Jahreszeit
 - * Strahlungsverlauf vor der Aufnahme
 - * Einflüsse durch Nachbarobjekte

Neben diesen beeinflussenden Elementen muss zusätzlich noch ein weiterer Umstand in Betracht gezogen werden: Weil in dieser Arbeit ausgedehnte Gebiete bearbeitet werden, können unter Umständen in einem Teil des Untersuchungsgebietes ganz andere Witterungsbedingungen herrschen als im anderen (Bsp. Föhninfluss etc.).

Die genaue Untersuchung des Thermalbildes ergab, dass sich Schnee (vor allem auf der Sonnenseite) dennoch gut von der "schneefreien Zone" (ausgenommen Wolken) trennen lässt. Die besonderen Eigenschaften von Schnee heben sich gegenüber den anderen Landschaftselementen deutlich ab. Die Differenz der Strahldichte zwischen Schnee und den anderen Landschaftselementen beträgt an sonnenbeschienenen Stellen über 100 Videowerte, weil der Schnee auch an der Sonne relativ kalt bleibt (um die 0°C-Grenze), die Landschaftselemente sich dagegen aufwärmen.

Bei Untersuchungen von Landschaftselementen wie Wiese und Wald muss aber ohne Bodenmessungen von der Verwendung des Thermalkanales abgeraten werden. Tests müssen nun zeigen, welche Ergebnisse sich mit reduzierter Kategorienzahl ergeben, und ob der 6. Kanal (und damit der problematische Thermalkanal) eventuell weggelassen werden kann (Kap. E.6.4).

6.4 Klassifikationen mit reduzierter Kategorienzahl

6.4.1 MCLAS- und DCLAS-Klassifikationen mit 23 Klassen

Zuerst wurden im Testgebiet mit sechs Kanälen eine DCLAS- und eine MCLAS-Klassifikation durchgeführt (Tab. 18 und 19).

Klassen Nr.	ursprüngliche Kat.bezeichnung (Tab. 4)	Anzahl Pixel	%	Haupt- Kat.
1	1	1'588	4.59	Schnee - Eis
2	2	1'148	3.32	
3	4	791	2.29	
4	5	302	0.87	
5	6	633	1.83	
6	7	786	2.27	
7	8	185	0.54	
8	9	433	1.25	
9	10	687	1.99	
10	11	206	0.60	
11	12	32	0.09	
12	13	76	0.22	

13	Sammelkat. A	924	2.67	schneefreie Zone
14	Sammelkat. B	159	0.46	
15	Sammelkat. C	4'422	12.80	
16	Sammelkat. D	217	0.63	
17	Sammelkat. E	5'646	16.34	
18	Sammelkat. F	178	0.52	
19	Sammelkat. G	917	2.65	
20	Sammelkat. H	13'571	39.27	
21	Sammelkat. I	882	2.55	
22	Sammelkat. K	426	1.23	
23	Sammelkat. L	351	1.02	
	nicht klassiert	0	0	
	Total	34'560	100.00	

Tab. 18: Ergebnisse der DCLAS-Klassifikation mit 23 Klassen und 6 Kanälen

Klassen Nr.	ursprüngliche Kt.bezeichnung (Tab. 4)	Anzahl Pixel	%	Haupt- Kat.
1	1	1'549	4.48	Schnee - Eis
2	2	1'133	3.28	
3	4	828	2.40	
4	5	383	1.11	
5	6	676	1.96	
6	7	772	2.23	
7	8	124	0.36	
8	9	391	1.13	
9	10	693	2.01	
10	11	206	0.60	
11	12	49	0.14	
12	13	61	0.18	
13	Sammelkat. A	398	1.15	schneefreie Zone
14	Sammelkat. B	404	1.17	
15	Sammelkat. C	830	2.40	
16	Sammelkat. D	9	0.03	
17	Sammelkat. E	4'411	12.76	
18	Sammelkat. F	180	0.52	
19	Sammelkat. G	1'276	3.69	
20	Sammelkat. H	8'001	23.15	
21	Sammelkat. I	8'640	25.00	
22	Sammelkat. K	840	2.43	
23	Sammelkat. L	612	1.77	
	nicht klassiert	2'094	6.06	
	Total	34'560	100.00	

Tab. 19: Ergebnisse der MCLAS-Klassifikation mit 23 Klassen und 6 Kanälen

6.4.2 MCLAS- und DCLAS-Klassifikationen mit fünf Kanälen

Im zweiten Schritt wurde nun versucht, mit dem MCLAS-Algorithmus eine 5-Kanal-Klassifikation (Thermalkanal eliminiert) im Testgebiet durchzuführen. Erst nach mehreren Probegängen konnte die richtige σ -Schwelle gefunden werden. Tab. 20 zeigt das Resultat.

Klassen Nr.	ursprüngliche Kategoriebezeichnung	Anzahl Pixel	%	Haupt-Kat.
1	1	1'666	4.82	Schnee - Eis
2	2	1'095	3.17	
3	4	610	1.77	
4	5	328	0.95	
5	6	679	1.96	
6	7	789	2.28	
7	8	189	0.55	
8	9	648	1.88	
9	10	626	1.81	
10	11	194	0.56	
11	12	58	0.17	
12	13	61	0.18	
13	Sammelkat. A	390	1.13	schneefreie Zone
14	Sammelkat. B	375	1.09	
15	Sammelkat. C	801	2.32	
16	Sammelkat. D	60	0.17	
17	Sammelkat. E	4'560	13.19	
18	Sammelkat. F	216	0.63	
19	Sammelkat. G	1'094	3.17	
20	Sammelkat. H	7'593	21.97	
21	Sammelkat. I	10'099	29.22	
22	Sammelkat. K	784	2.27	
23	Sammelkat. L	587	1.70	
	nicht klassiert	1'058	3.06	
	Total	34'560	100.00	

Tab. 20: Ergebnisse der MCLAS-Klassifikation mit 23 Klassen und 5 Kanälen

Wie ein Vergleich mit der Tab. 19 zeigt, beträgt der quantitative Unterschied zwischen der 6-Kanal- und der 5-Kanal-MCLAS-Klassifikation bei den Schnee-Eis-Kategorien maximal 0.75 % (Kategorie 9), was unter der Toleranzgrenze liegt. Daraus kann gefolgert werden, dass bei den in unserem Testgebiet herrschenden Bedingungen eine Schnee-Eis-Klassifikation mit dem MCLAS-Algorithmus mit nur 5 Kanälen durchgeführt werden darf.

Trotz den in Kap. E.5.2 gemachten Einschränkungen wurde versucht, auch mit dem DCLAS-Algorithmus eine 5-Kanal-Klassifikation durchzuführen, da der kräftige Anstieg der Fehlzuordnungen bei der 5-Kanal-Stichprobenklassifikation vor allem bei Kategorien zu beobachten war, die auf dem gesamten Untersuchungsgebiet nur untergeordnet und kleinflächig auftreten.

Nachdem, wie bei jeder DCLAS-Klassifikation nötig, die Grenzschränken der einzelnen Kategorien abgestimmt worden waren, konnte ein positives Resultat erzielt werden. Die quantitativen Abweichungen zum 6-Kanal-Ergebnis waren ebenfalls minimal (Tab. 21).

Aus dem Ergebnis darf gefolgert werden, dass trotz der relativ hohen Fehlerquote bei der 5-Kanal-Stichprobenklassifikation (aber bei flächenmässig untergeordneten Kategorien) bei den im Untersuchungsgebiet herrschenden Bedingungen auch mit dem DCLAS eine genügende 5-Kanal-Schneeklassifikation erarbeitet werden konnte.

Klassen Nr.	ursprüngliche Kate- gorienbezeichnung	Anzahl Pixel	%	Haupt- Kat.
1	1	1'582	4.58	Schnee - Eis
2	2	1'103	3.19	
3	4	813	2.35	
4	5	348	1.01	
5	6	647	1.87	
6	7	745	2.16	
7	8	253	0.73	
8	9	345	1.00	
9	10	659	1.91	
10	11	264	0.76	
11	12	4	0.01	
12	13	94	0.27	

13	Sammelkat. A	1'353	3.91	schneefreie Zone
14	Sammelkat. B	138	0.40	
15	Sammelkat. C	5'909	17.10	
16	Sammelkat. D	341	0.99	
17	Sammelkat. E	5'271	15.25	
18	Sammelkat. F	93	0.27	
19	Sammelkat. G	844	2.44	
20	Sammelkat. H	12'251	35.45	
21	Sammelkat. I	767	2.22	
22	Sammelkat. K	460	1.33	
23	Sammelkat. L	276	0.80	
	nicht klassiert	0	0	
	Total	34'560	100.00	

Tab. 21: Ergebnisse der DCLAS-Klassifikation mit 23 Klassen und 5 Kanälen

7. Cluster-Klassifikation

Das CLUS-Programm gehört zu jenen Cluster-Algorithmen, die auf die Berechnung der vollständigen Distanzmatrix zwischen allen Pixeln verzichtet (Kap. D.1.2.1).

Mit Probeklassifikationen im Testgebiet, in dem über die Lage der einzelnen Kategorien genaue Kenntnisse bestehen, wurde das CLUS-Programm auf seine Tauglichkeit hin geprüft. Durch Vergleiche mit der Bodenkarte (Kap. E.9.1) konnte dann beurteilt werden, ob sich das CLUS-Programm zur Klassifikation von Schneeflächen eigne. Als Kriterium musste dabei neben der Genauigkeit der Kategorienabgrenzung auch der Aufwand an Rechenzeit berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu den MCLAS- und DCLAS-Algorithmen entfällt bei den Cluster-Techniken das aufwendige Heraussuchen der Stichprobenflächen und das Berechnen der Stichproben- und Kategorienstatistik. Um konkurrenzfähig zu bleiben, dürfen die Kosten von Cluster-Klassifikationen deshalb höher liegen als die der "supervised" Klassifikationen.

Der Benützer kann den Ablauf des CLUS-Programmes durch Eingabe von Parametern steuern. Diese Möglichkeit verursacht gewisse Probleme. Da üblicherweise bei der Anwendung des Cluster-Programmes die Landschaftselemente a priori nicht bekannt sind, ja erst durch das Resultat der Cluster-Analyse gezielt bestimmt werden können, weiss der Benützer nicht, was für Grenzwerte (Kap. D.1.2.3) er einzugeben hat.

In unserem Fall wurde versucht, mit den in Kap. E.5.2 ausgewählten sechs Kanälen das Resultat der Cluster-Analyse in zahlreichen Versuchen dem "Bodenbild" anzugleichen. Um die Grenzwerte in der Analyse immer kontrolliert anzupassen, wurde jeweils nur ein einzelner Parameter verändert. Das entsprechende Resultat wurde dann mit der Bodenkarte verglichen und daraus Schlüsse für die neue Festsetzung der Parameter gezogen.

Versuche zeigten bald, dass eine kleine Veränderung eines Parameters (Bsp. Veränderung der Stichprobenzahl oder der kritischen Distanz für die erste Linie) grosse Auswirkungen haben kann: Die Statistik der Cluster kann sich dadurch so gravierend ändern, dass das neu entstehende Cluster-Bild überhaupt keine Ähnlichkeit mit den vorangehenden mehr hat.

Nach einer langen Versuchsreihe zeigte sich, dass das Bodenbild (Kap. E.9.1) mit unserem Cluster-Algorithmus nicht annähernd wiedergegeben werden kann. So konnte z.B. Schnee in Schattenlage nicht von "schneefreien" Kategorien getrennt werden. "Schmutziger Schnee" und "schneefreie Zone" sowie "Wolken" und "trockener Schnee" wurden häufig in eine einzige Gruppe

zusammengefasst. Tab. 22 gibt eine Resultatsübersicht von der "besten" Cluster-Klassifikation.¹⁾

Nr.	Bezeichnung der Oberflächeneinheiten	Anzahl	%	Haupt-Kat.
1	Schnee	885	2.56	Schnee-Eis
2	Schnee - Eis	2'556	7.40	
3	Schnee schmutzig	2'663	7.71	
4	Schnee schmutzig	724	2.10	
Total		6'828	19.76	
5	schneefreie Zone (Ausap.)	2'299	6.65	schneefreie Zone
6	Wolken	448	1.30	
7	schneefreie Zone	9'198	26.61	
8	schneefreie Zone	7'599	21.98	
9	schneefreie Zone	7'098	20.53	
10	schneefreie Zone	965	2.79	
nicht klassiert		127	0.37	
Total		34'560	100.00	

Tab. 22: Ergebnisse der Cluster-Klassifikation

Obwohl sich das Gesamt-Resultat der Hauptkategorie Schnee-Eis von den Ergebnissen der "überwachten" Klassifikationen nur unwesentlich abhebt (Tab. 23), zeigt die Resultatsanalyse, dass die Cluster-Klassifikation den Genauigkeitsanforderungen bei weitem nicht genügt. Extrem homogene Kategorien wie trockener Schnee vermag das Cluster-Programm exakt auszusondern. Sobald es aber verschiedene Bodenelemente gibt, die von der spektralen Signatur her nahe beieinander liegen, kann das Programm keine konsequente Abtrennung mehr gewährleisten. Anwendungen in Regionen ausserhalb unseres Testgebietes bestätigen diese Tatsache ausnahmslos.

- 1) Die mit der CLUS-Klassifikation entstehenden Kategorien dürfen nicht mit denjenigen der "überwachten" Verfahren verglichen werden.

Mit anderen Skylab-MSS-Daten aus dem Bernina-Gebiet wurde der Versuch gemacht, eine Cluster-Analyse ohne a priori "Bodenkenntnisse" auszuführen. Der nachträgliche Vergleich mit hochauflösenden Skylab-Photographien zeigte ebenfalls grosse Unterschiede in der Schneeflächenwiedergabe. Daraus muss der Schluss gezogen werden, dass trotz der kostensparenden Arbeitsweise der in dieser Untersuchung verwendete Cluster-Algorithmus für Schneeflächenkartierungen nicht geeignet ist.¹⁾

7.1 Verwendungsmöglichkeiten

Obwohl sich der Cluster-Algorithmus für allgemeine Klassifikationen wenig eignet, heisst das nicht, dass die unüberwachten Verfahren nutzlos auf die Seite gelegt werden müssen.

Die Stichprobenanalyse (Kap. E.3) hat gezeigt, dass das Cluster-Programm als Hilfsmittel bei der Suche nach homogenen Stichproben eingesetzt werden kann. Werden die Grenzwerte im CLUS-Programm stark eingeengt, wird nur ein kleiner Teil des Untersuchungsgebietes klassiert. Daraus darf gefolgert werden, dass die klassierten Bildelemente der schmalen statistischen Schranken wegen von homogenen Bodenobjekten stammen. Auf diese Art und Weise lässt sich schon vor der eigentlichen Stichprobenanalyse eine grobe Vorstellung über die räumliche Verteilung einiger markanter Landschaftselemente machen.

Eine zweite Anwendungsmöglichkeit des Cluster-Programmes findet sich ebenfalls bei der Stichprobenanalyse: Wie schon im Kap. E.3.4.3 beschrieben, können mit Hilfe des CLUS-Programmes aus einer vorgängig bekannten Oberflächeneinheit, die aber aus Gründen der Exposition, der Neigung, der Qualität etc. eine grosse Streuung aufweist, Unterkategorien mit kleinen Standardabweichungen (Bsp. Felsen - Schatten) gebildet werden. Dadurch können stark streuende Kategorien, die bei der MCLAS-Klassifikation homogene Kategorien überlagern und diese dadurch zum Verschwinden bringen, eliminiert werden.

1) Dr. Q.A. Holmes, Infrared and Optics Divisions, Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), der jahrelang mit verschiedensten Cluster-Techniken gearbeitet hat, bestätigte anlässlich eines Besuches 1979 unsere negativen Erfahrungen.

8. Inkremente

Eine weitere Möglichkeit, bei automatisierten Klassifikationsverfahren die Kosten zu senken, eröffnet sich durch die Erhöhung der Inkrement-Zahl.

Mit Inkrement 2¹⁾ kann die ursprüngliche Pixelzahl pro Flächeneinheit um 75 % reduziert werden. Bei Inkrement 4²⁾ werden sogar nur noch 6.25 % der ursprünglichen Bildelemente in die Klassifikationen einbezogen. Im IBIS-Programmpaket ist diese Inkrement-Option leider noch nicht verwirklicht. Das PSU (Pennsylvania State University)-ORSER-Programmpaket, mit dem auf dem alten IBM-370 Computer der Universität Zürich noch gerechnet werden konnte, das aber aus Kompatibilitätsgründen nicht mehr auf den neuen IBM-3033 übertragen wurde, ermöglichte die Inkrement-Arbeitsweise. Deshalb wurden, solange noch auf dem IBM-370 gearbeitet werden konnte, mit dem PSU-DCLAS (der Algorithmus entspricht dem IBIS-DCLAS) Testklassifikationen mit 6 Kanälen und 42 Kategorien durchgeführt. Untersucht wurde, wie weit die Inkrement-Zahl erhöht werden kann, bis sich die Aussagekraft einer Klassifikation merklich verschlechtert. Zu diesem Zwecke wurden aus dem Untersuchungsgebiet drei verschieden grosse Ausschnitte ausgesucht (22'000 Pixel, 42'000 Pixel, 120'000 Pixel), die alle 42 Kategorien enthalten und mit dem PSU-DCLAS klassiert. Gearbeitet wurde mit den Inkrementzahlen 1 (Normalklassifikation), 2 und 4.

Die Resultate der Inkrement-2-Klassifikation entsprechen beinahe den Ergebnissen der Normalklassifikation. Die Abweichung (nur auf die Schnee-Eis-Fläche bezogen = 100 %) schwankte in den drei klassierten Bildausschnitten zwischen 0.21 % bis 0.37 %.

Bei der Betrachtung jedes 4. Pixels musste man bei einzelnen Schnee-Kategorien Prozentabweichungen zwischen 4.2 % und 6.9 % (bezogen auf die Schnee-Eis-Fläche) in Kauf nehmen. Gegenüber der Normalklassifikation konnte mit Inkrement 4 aber eine Zeiteinsparung um das 7.5-fache erzielt werden.

Aus den oben beschriebenen Ergebnissen darf gefolgert werden, dass für eine operationelle Schneeflächenkartierung Inkrement 2 verwendet werden kann, d.h. für die Schneeflächenkartierung im europäischen Hochgebirge genügt vermutlich eine Bildauflösung von ca. 150 Meter. Dadurch lässt sich die Rechenzeit für eine Klassifikation um das 3-fache reduzieren. Trotz der grossen Zeitersparnis um das 7.5-fache kann man bei Schneekartierungsprojekten der grossen Fehlerabweichungen wegen nicht mehr daran denken, mit Inkrement 4 zu arbeiten.

1) Es wird nur immer jedes 2. Pixel und jede 2. Linie behandelt.

2) Es wird nur immer jedes 4. Pixel und jede 4. Linie behandelt.

9. Grundlagen zur Ueberprüfung der Klassifikationsresultate

Um die Qualität der verschiedenen Klassifikationen überprüfen zu können, muss sowohl ein quantitativer als auch ein räumlicher Vergleich der Klassifikationen mit einer die Schnee- und Eisverhältnisse im Aufnahmezeitpunkt wiedergebenden Bodenkarte durchgeführt werden. Dazu musste zuerst diese Bodenkarte erstellt werden.

9.1 Herstellung der Bodenkarte

Als Grundlage dienten die topographischen Landeskarten Nr. 274 und Nr. 284 im Massstab 1:50'000, Luftbilder des Militärflugdienstes, sowie die Skylab-Photographien S 190 A (Kap. B.2.3).

Als erstes wurde mit Hilfe markanter Landschaftselemente (Bsp. Bachläufe, Bergspitzen, Berggrate etc.), die sowohl auf der Landeskarte als auch im Luftbild genau lokalisierbar sind, auf Folien über den Luftbildern ein verzerrtes Kilometernetz konstruiert. Anschliessend wurden die Schnee- und Eisflächen in den Luftbildern kartiert. Mit Hilfe visueller Methoden wurden dann die verzerrten Grenzlinien der Schnee- und Eisflächen in die Landeskarte umgezeichnet. Dabei konnte die Feststellung gemacht werden, dass die Schnee- und Eisflächenanteile im September 1973 nur minimal von denjenigen der topographischen Landeskarten (Ausgabe 1968) abweichen.

Zur Kontrolle wurde das Umzeichenverfahren mit Hilfe eines Zoom-Transfer-Scopes (Marke: Bausch & Lomb) wiederholt. Abweichungen gegenüber dem ersten Verfahren wurden überprüft und korrigiert.

9.1.1 Einzeichnen der Wolkenschleier

Bei der Analyse der Daten zeigte sich, dass sich im Testgebiet im Moment der Aufnahme auch einige sehr kleinflächige Wolkenschleier befanden. Wegen ihres feinen, schleierhaften Aussehens konnten sie z.T. äusserst schlecht eruiert werden.

Um die Schnee- und Eisflächen genau bestimmen zu können, mussten diese Wolkenschleier jedoch auch in der Bodenkarte eingetragen werden. Dazu wurden die Skylab S 190 A - Photographien herangezogen. Diesen Aufnahmen, die sich am Rande überlappen und dadurch ein stereoskopisches Sehen ermöglichen, ist es zu verdanken, dass die Wolkenschleier, die erst unter dem Stereoskop ausfindig gemacht werden können, überhaupt entdeckt und lagerichtig kartiert werden konnten.

Abb. 5 zeigt das Resultat dieser Arbeit. Dargestellt sind die Schnee-Eis-Grenzen sowie die Wolkenschleier wie sie im Testgebiet am 11. September 1973 um ca. 13 Uhr zu beobachten waren.

Da beim Kartieren die Wolkenschleierränder auch bei stereoskopischem Sehen nicht immer genau festzulegen waren, muss für die nachfolgenden Vergleiche ein Fehler miteinbezogen werden, der maximal auf 5 % der gesamten Schnee-Eisfläche geschätzt wurde (Fehlerschätzung durch Ausplanimetrieren der Wolkenfelder über der Schnee-Eis-Region).



Abb. 5: Bodenkarte des Testgebietes

Legende:



Schnee-Eisflächen am 11. September 1973

schraffierte Fläche = Wolkenschleier

Massstab ca. 1:210'000

A = Saas Fee

D = Alphubel

B = Herbriggen

E = Balfrin-Gletscher

C = Dom

(siehe dazu Fig. 14)

10. Digitaler Vergleich Bodenbild - Klassifikation

10.1 Voraussetzungen

Mit digitalen Verfahren sollen die Klassifikationsergebnisse bezüglich ihrer Genauigkeit überprüft werden. Dabei wird die räumliche Verteilung der gesamten, im Testgebiet vorkommenden Schnee- und Eisfläche untersucht. Als Vorlage dienen einerseits die Klassifikationsresultate und andererseits die Bodenkarte (Kap. 9). In einem ersten Schritt mussten die Grenzen der Schnee-Eisflächen im Bodenbild mit einem Digitizer (Kap. E.3.4.2) abgefahren werden, damit diese Daten in ein digitales Verfahren einbezogen werden konnten. Dabei wurden die Anfangskoordinaten und die bei jeder Richtungsänderung aufgenommenen Koordinaten auf einen Lochstreifen gedruckt. So konnten auch von den kleinsten Schneeflächen im Testgebiet (minimal zwei Pixel) die polygonalen Grenzlinien, deren Ecken durch Satellitenbild-Koordination¹⁾ fixiert wurden, hergestellt werden. Diese Koordinaten wurden Programmen der COMAP-Programmbibliothek²⁾, die Computerkarten herzustellen vermögen, eingegeben und eine Karte der Schnee-Eis-Fläche ausgedruckt. Mit diesem digitalisierten Bodenbild wurde die Voraussetzung geschaffen, sowohl genaue quantitative Vergleiche vorzunehmen als auch optische Ueberlagerungen Bodenbild - Klassifikationen herzustellen.

Leider zeigt sich bei der Betrachtung der digitalisierten Bodenkarte schnell ein diesem Verfahren anhaftender Nachteil. Eine Linie entsteht beim Digitalisieren durch das Aneinanderlagern von Koordinatenpunkten eines orthogonalen Koordinatensystems. Daraus folgt, dass nur Grenzen, die genau in Richtung der X-, resp. Y-Achse verlaufen, auch als Linien wiedergegeben werden können. Die Koordinatenpunkte quer verlaufender oder gebogener Grenzen müssen zuerst in einem Interpolationsverfahren berechnet werden und bekommen in der graphischen Darstellung ein treppenförmiges Aussehen (Fig. 20).

Am Rande jeder einzelnen Schnee-Eisfläche entsteht durch diese Treppendarstellung bezüglich der Flächenwiedergabe ein Fehler. Dieser Fehler nimmt ab, je grösser die Fläche ist, weil sich die Fläche im Verhältnis zum Umfang quadratisch vergrössert. Bei den z.T. äusserst kleinen Schneeflächen, die im Testgebiet vorkommen, wird der Fehler relativ gross, wobei die dendritischen Formen der Schneeflächen den Umfang zusätzlich noch vergrössern.

- 1) Die Satellitenbild-Koordinaten werden durch die Kolonnen- und Linienzahlen eines MSS-Bildes gegeben.
- 2) Programmbibliothek, die von Dr. G. DORIGO und Dr. F. FASLER, Geographisches Institut der Universität Zürich, entwickelt wurde.

Leider besteht keine Möglichkeit, diesen Fehler zu beheben. Zusätzlich muss sogar noch eine weitere Fehlerquelle in Betracht gezogen werden. Der Grundsatzentscheid, ob man die Koordinatenpunkte der Umgrenzungslinie der Schnee-Eis-Fläche oder aber der schneefreien Zone zuordnen will, beeinflusst die jeweilige Flächenausdehnung vor allem bei kleinen Flächen wesentlich. Mit einer abwechslungsweisen Zuordnung kann dieser Fehler etwas verkleinert werden.

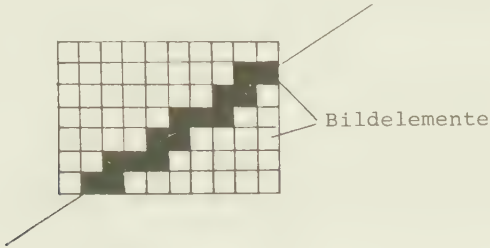


Fig. 20: Darstellung einer quer verlaufenden Grenze in einem digitalisierten Bild

10.2 Vergleich

Mit Hilfe des PPD-Algorithmus (Kap. E.4.2.1) wurde nun das digitalisierte Bodenbild mit den erstellten Klassifikationen (Kap. E.4 - E.6) verglichen. Unterschieden wurde nur zwischen den beiden Hauptkategorien "Schnee - Eis" und "schneefreie Zone". Das Resultat der Ueberlagerung MCLAS-Klassifikation 8 Kan/42 Kat. - Bodenbild ergab bezogen auf die Schnee-Eis-Fläche einen Fehler von $32 \% \pm 5 \%$. Dieser Fehler setzt sich einerseits aus den Fehlern der Klassifikationen selber und andererseits aus den oben erwähnten Fehlern zusammen. Zusätzlich kommt noch eine dritte Fehlerquelle hinzu: Ein Satellitenbildelement mit einer Auflösung von 79×79 m kann nie genau auf einer Bodenkarte lokalisiert werden (LICHTENEGGER, 1980). Bei der Festsetzung der Fixpunkte Satellitenbild - Karte muss, wie in Kap. E.3.4.2 schon erwähnt, mit einer Genauigkeit ± 1 Pixel gerechnet werden. Das Satellitenbild und die Landeskarte 1:50'000 werden folglich nie genau übereinander liegen, was bei einem Vergleich Bodenbild - Klassifikation einen nicht unerheblichen Fehler bewirkt. Aufgrund dieser negativen Resultate ist ein quantitativer Vergleich Klassifikation - Bodenbild mit der Digitalisierungsmethode im Testgebiet auszuschliessen.

Es muss jedoch festgehalten werden, dass das Scheitern dieser Methode vorwiegend durch den Umstand erklärt werden kann, dass viele kleine, unregelmässige Flächen digitalisiert werden mussten. Bei sehr grossen, rechteckigen Flächeneinheiten (Bsp. Weizenfelder in den USA) dürfte diese Methode bessere Ergebnisse bringen.

11. Analoger Vergleich

11.1 Ausmessen der Schnee-Eis-Flächen

Weil das Digitalisierungs-Verfahren keine brauchbaren Ergebnisse lieferte, um die Klassifikationen auf ihre Genauigkeit hin überprüfen zu können, musste eine konventionelle, analoge Vergleichsmöglichkeit herangezogen werden.

Die auf der Bodenkarte eingetragene Schnee-Eis-Fläche wurde mit einem Planimeter (Marke: Coradi SRP-1) ausgemessen. Weil ein Teil der Schnee-Eis-Fläche von Wolkenschleiern überlagert war, musste sie im Bodenbild um diesen Anteil verkleinert werden.

Die so entstandene, für den Klassifikationsvergleich relevante Schnee-Eis-Fläche hatte schliesslich eine Ausdehnung von $35.2 \text{ km}^2 \pm 15 \%$.

Beim Uebertragen der Informationen vom Luftbild auf die Bodenkarte, sowie in kleinerem Rahmen auch beim Planimetrieren, muss unbedingt ein Fehler einberechnet werden, der auf 10 % geschätzt wurde (aufgrund von Vergleichen topographische Landeskarte - Luftbilder im Bereich des jeweiligen Nadirs). Der Fehler beim Wolkeneinzeichnen wurde mit 5 % geschätzt (Kap. E.9.1.1). Der Gesamtfehler bewogt sich also im Bereich von 15 %.

11.2 Resultatsübersicht der Flächenmessung aller Klassifikationen

In Tab. 23 wird eine Resultatsübersicht sämtlicher durchgeführter Klassifikationen unter Berücksichtigung aller Schnee-Eis-Kategorien und der Gesamtfläche zusammengestellt. Aufgrund der in Kap. B.2.4.3 beschriebenen Pixelgrösse (1 Pixel = $4'887.5 \text{ m}^2$) konnten die quantitativen Klassifikationsresultate (Anzahl Pixel pro Kategorie) in Flächeneinheiten umgerechnet werden.

Kat.Nr.	DCLAS 42 Kat/12 Kan	MCLAS 42 Kat/8 Kan	DCLAS 23 Kl/6 Kan	MCALS 23 Kl/6 Kan	DCLAS 23 Kl/5 Kan	MCLAS 23 Kl/5 Kan
1	7.526	7.526	7.711	7.526	7.694	8.098
2	5.662	5.258	5.578	5.510	5.359	5.326
3	0.504	0.235	-	-	-	-
4	3.914	4.015	3.847	4.032	3.948	2.974
5	1.529	1.949	1.462	1.865	1.697	1.596
6	3.192	3.226	3.074	3.293	3.142	3.293
7	3.898	3.746	3.814	3.746	3.629	3.830
8	1.025	0.605	0.907	0.605	1.226	0.924
9	2.302	1.915	2.100	1.898	1.680	3.158
10	3.343	3.360	3.343	3.377	3.209	3.041
11	1.042	0.991	1.008	1.008	1.277	0.941
12	0.084	0.050	0.151	0.235	0.017	0.286
13	0.454	0.235	0.370	0.302	0.454	0.302
Total	33.111	33.365	33.365	33.397	33.332	33.769

Tab. 23: Resultatsübersicht über alle im Testgebiet durchgeführten Klassifikationen.
Es sind nur die Schnee-Eis-Kategorien aufgeführt. Angaben in km².

Es fällt auf, dass die Unterschiede der Gesamtergebnisse zwischen den sechs Klassifikationen sehr klein sind. Einzelne Kategorien weichen dagegen z.T. stark voneinander ab (z.B. Kategorie 9 mit einer maximalen Differenz von 1.478 km^2).

Diese Abweichungen werden aber durch verwandte Kategorien wieder kompensiert, so dass sich am Gesamtergebnis praktisch nichts ändert. Die Abweichungen können dadurch entstehen, dass bei jeder Klassifikation ein anderes "Threshold" gewählt werden musste. Die Schranken wurden jeweils so gelegt, dass möglichst keine Fehler gegen aussen, d.h. gegen Kategorien der "schneefreien Zone" auftraten. Ueberlagerungen innerhalb der Hauptkategorie "Schnee" können dabei aber vorkommen, was schon die Stichprobenklassifikationen gezeigt haben (Kap. E.4.1.1).

Grössere Differenzen innerhalb der einzelnen Kategorien treten hauptsächlich in den beiden 5-Kanal-Klassifikationen auf. Diese Tatsache wurde bereits bei den Stichprobenklassifikationen festgestellt. Der Grund, warum trotz grösserer Fehler in der Stichprobenklassifikation die 5-Kanal-Klassifikation ebenfalls berücksichtigt wurde, wird im Kap. E.15 ausführlich behandelt.

11.3 Quantitativer Vergleich der Schnee-Eis-Flächen der sechs Klassifikationsergebnisse mit der Bodenkarte

In Tab. 24 werden die Flächenanteile der Schnee-Eis-Kategorien aller sechs Klassifikationen mit der Schnee-Eis-Bezugsfläche aus dem Bodenbild ($35.2 \text{ km}^2 \pm 15 \%$) verglichen.

Klassifikation	DCLAS 42 Kat/12 Kan	MCLAS 42 Kat/8 Kan	DCLAS 23 Kl/6 Kan	MCALS 23 Kl/6 Kan	DCLAS 23 Kl/5 Kan	MCLAS 23 Kl/5 Kan
Flächenanteil	33.1 km^2	33.4 km^2	33.4 km^2	33.4 km^2	33.3 km^2	33.8 km^2
Differenz	$- 2.1 \text{ km}^2$	$- 1.8 \text{ km}^2$	$- 1.8 \text{ km}^2$	$- 1.8 \text{ km}^2$	$- 1.9 \text{ km}^2$	$- 1.4 \text{ km}^2$
Differenz	$\sim 6 \%$	$\sim 5 \%$	$\sim 5 \%$	$\sim 5 \%$	$\sim 5 \%$	$\sim 4 \%$

Tab. 24: Vergleich der Schnee-Eis-Flächenanteile der sechs Klassifikationsergebnisse mit dem "Bodenbild"

Bei allen sechs Klassifikationen liegen die Resultate unter jener der Bezugsfläche. Dafür sind die zwei folgenden Gründe verantwortlich:

1. Die stark verschmutzten Schnee-Eis-Zonen am Ende der Gletscherzungen wurden vielfach nicht mehr den Schnee-Eis-Kategorien zugeordnet. Im Luftbild hingegen konnten diese Randpartien trotz starker Verschmutzung visuell genau abgegrenzt werden.
2. Da die Mischkategorie "ausapernder Schnee" (Schotter-Felsen-Schnee) der Hauptkategorie "schneefreie Zone" zugeordnet werden musste (Kap. E.3.3), wird an den Schnee-Eisrändern zu wenig "Schnee - Eis" klassiert.

Die Fehler aller sechs Klassifikationen sind ungefähr gleich, so dass man aus der Sicht der quantitativen Betrachtung den provisorischen Schluss ziehen darf (Kap. E. 12), dass sowohl mit dem DCLAS als auch mit dem MCLAS mit den im Reduktionsverfahren ermittelten Kanal- und Kategorienzahlen praktisch dieselben Resultate wie mit der maximalen Kanal- und Kategorienzahl erreicht werden.

11.4 Räumlicher Vergleich einzelner Klassifikationen mit der Bodenkarte

Obwohl sich die flächenmässigen Differenzen der Klassifikationen zum Bodenbild quantitativ in sehr engen Grenzen halten, darf daraus nicht geschlossen werden, dass die räumliche Verteilung der Schnee-Eis-Flächen in den einzelnen Klassifikationen ebenfalls übereinstimmen. Falschklassierungen zwischen den Hauptkategorien können sich kompensieren, so dass die quantitativen Schlussresultate wohl ähnlich oder sogar gleich sind, bei einer visuellen Betrachtung der räumlichen Verteilung der Klassifikationen hingegen grosse Abweichungen festgestellt werden müssen.

Aus diesem Grunde ist es unerlässlich, die Klassifikationen auch optisch mit der Bodenkarte zu vergleichen, um über die Qualität der einzelnen Klassifikationen ein schlüssiges Urteil abgeben zu können.

Der nachfolgende, analoge Vergleich durch Ueberlagern der auf einer Transparent-Folie eingezeichneten Bodenkarte mit den Klassifikationen kann nur eine subjektive Qualitätsüberprüfung darstellen. Den Vergleich mit dem objektiven, automatisierten Digitalisierungsverfahren, der ein genaues quantitatives Resultat der Abweichungen geben könnte, kann er nicht vollwertig ersetzen.

11.5 Glätten ("Smoothing")

Die Klassifikationsdarstellungen sind auch für das Auge eines geübten Interpreten oft im Detail relativ unübersichtlich. Deshalb wurden alle Klassifikationsdarstellungen vor der Ueberlagerung mit der Bodenkarte mit dem GLAETT-Programm aus der IBIS-Programmbibliothek behandelt. Mit diesem Programm wird erreicht, dass die Klassifikationen etwas vereinheitlicht (d.h. generalisiert) werden. Eine ausführliche Beschreibung des GLAETT-Programmes findet sich bei ITTEN und FASLER (1979). Hier soll nur eine kurze Uebersicht gegeben werden.

Durch das Glätten soll ein diffuses, stark aufgegliedertes Bild vereinfacht und vereinheitlicht werden. Jedes Bildelement wird dabei mit seinen unmittelbaren Nachbarn verglichen. Das Ausmass der in Betracht gezogenen Nachbarschaftsmatrix (3x3, 5x5 oder grösser) kann vom Interpreten festgelegt werden. Liegen nun mehrheitlich gleiche Nachbarpixel vor, die sich aber von dem zu behandelnden Bildelement unterscheiden, nimmt das untersuchte Pixel den Wert seiner Nachbarn an.

Eine weitere Programm-Option erlaubt es dem Benützer, jedes Element in der Matrix zu gewichten. Für jede in der Klassifikation unterschiedene Kategorie kann eine gesonderte Matrix festgesetzt werden. Mit Hilfe dieser Option kann der Interpret folglich gezielt auf regelmässig auftretende Fehler eingehen (Bsp. Scanner-Fehler) und sie eliminieren.

Mit der Glätt-Methode wird ein Bild aber nicht a priori verbessert. Oft gehen gewisse Detail-Informationen auf Kosten einer übersichtlicheren Wiedergabe verloren.

11.5.1 Vorgehen

Damit die Klassifikationsergebnisse nicht übermässig generalisiert werden und dadurch der ursprüngliche Informationsgehalt verfälscht wird, musste eine Versuchsreihe erstellt werden. Da kein systematischer Fehler berücksichtigt werden musste, konnte mit symmetrischen Matrizen gearbeitet werden. Von einer 3x3-Matrix wurde folgende Testreihe erstellt:

1	1	1
1	1	1
1	1	1

bis

1	1	1
1	7	1
1	1	1

Es wurden also nur die zu behandelnden Pixel gewichtet. Zusätzlich wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Nachbarpixel gewichtet wurden. Da es schon bei einer 3x3-Matrix eine äusserst grosse Zahl von Gewichtungsmöglichkeiten gibt, wurden nur stichprobenhaft einige dieser Möglichkeiten getestet.

Die Analyse der gesamten Testreihe ergab, dass sich die folgende Matrix am besten für unsere Zwecke eignet:

1	1	1
1	2	1
1	1	1

In Abb. 6 wird in der Gegenüberstellung Normalklassifikation - Glätt-Klassifikation der Generalisierungseffekt des Glättens veranschaulicht. Tab. 25 zeigt die quantitativen Veränderungen, die sich durch das Glätten ergeben haben. Bei einzelnen Klassen treten bereits deutliche Verschiebungen auf.

Gesamthaft ist die Schnee-Eis-Fläche in der Glätt-Klassifikation etwas kleiner (2.9 % bezogen auf die Schnee-Eis-Fläche), weil die vielen kleinen Schnee-Eis-Flecken in der Normalklassifikation durch das Glätten der Hauptkategorie "schneefreie Zone" zugeordnet wurden. Innerhalb der grossen, kompakten Schnee-Eisfelder ist der umgekehrte Vorgang zu beobachten, doch treten diese Zuordnungen weniger häufig auf.



Abb. 6: Vergleich zwischen den Ergebnissen der Glätt-Klassifikation MCLAS 23K1/5Kan (links) und denjenigen der ursprünglichen Klassifikation MCLAS 23K1/5Kan (rechts). Schnee-Eis-Kategorien (schwarz), schneefreie Kategorien (weiss), Massstab~1:350'000

Klassen Nr.	ursprüngliche Kat.bezeichnung	Glätt- Klass. %	Ursprungs- Klass. %	Haupt- Kat.
1	1	5.27	4.82	Schnee - Eis
2	2	3.31	3.17	
3	4	1.76	1.77	
4	5	0.84	0.95	
5	6	1.96	1.96	
6	7	2.32	3.06	
7	8	0.33	0.55	
8	9	1.87	1.88	
9	10	1.88	1.81	
10	11	0.49	0.56	
11	12	0.09	0.17	
12	13	0.15	0.18	
Subtotal		20.27	20.88	
13	Sammelkat. A	0.90	1.12	schneefreie Zone
14	Sammelkat. B	1.01	1.09	
15	Sammelkat. C	1.70	2.32	
16	Sammelkat. D	0.09	0.17	
17	Sammelkat. E	13.64	13.19	
18	Sammelkat. F	0.47	0.63	
19	Sammelkat. G	2.80	3.17	
20	Sammelkat. H	22.03	21.97	
21	Sammelkat. I	30.99	29.22	
22	Sammelkat. K	2.14	2.27	
23	Sammelkat. L	1.31	1.70	
nicht klassiert		2.63	3.06	
Total		100.00	100.00	

Tab. 25: Vergleich der geglätteten MCLAS 23K1/5Kan-Klassifikation mit der ursprünglichen MCLAS 23K1/5Kan-Klassifikation

11.6 Ueberlagerung Klassifikation - Bodenbild

Um die Klassifikationen dem Bodenbild überlagern zu können, mussten vorerst noch die verzerrten Klassifikationsergebnisse geometrisch korrigiert werden.

11.6.1 Geometrische Korrektur der Klassifikationsergebnisse

Der durch die Ueberlappung entstandene Abstand der Bildelements-mittelpunkte der MSS-Daten in der X- und Y-Richtung (Zeilen- und Kolonnen-Richtung) ist nicht gleich gross (Kap. B.2.4.3). Das Photomation-System erzeugt aber quadratische Bildelemente. Deshalb muss, um diesen durch die Aufbelichtung der Daten entstandenen Fehler wieder aufheben zu können, ein Korrekturfaktor berechnet werden. Die Berechnung dieses Faktors bezieht sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet, das sich im MSS-Bild aus 1'565 Linien (s) (entspricht einer Bodendistanz (S) von 112.5 km) sowie 1'036 Kolonnen (k) (entsprechende Bodendistanz (K): 69.5 km) zusammensetzt (Abb. 1). Daraus lässt sich folgendes Verhältnis ableiten:

$$\frac{\underline{s}}{\underline{S}} = \frac{\underline{112.5}}{\underline{1'565}} = \underline{1.0716}$$
$$\frac{\underline{k}}{\underline{K}} = \frac{\underline{69.5}}{\underline{1'036}}$$

Wegen der quadratischen Wiedergabe von Bildelementen belichtet das Photomation-System die k-Richtung um den Faktor 1.07 zu gross auf. Um diesen Fehler rückgängig zu machen, muss die s-Richtung mit dem Faktor 1.07 vergrössert werden.

Gleichzeitig mit der geometrischen Korrektur kann durch Einbeziehung eines Vergrößerungsfaktors v (ganzzahlig) das Bild jedem gewünschten Massstab angeglichen werden.

Das Verfahren läuft dann so ab, dass die k-Richtung immer denselben Vergrößerungsfaktor v beibehält, während in der s-Richtung v und (v+1) in einem durch den Korrekturfaktor bestimmten Verhältnis abwechseln. Da es sich hier um ein Annäherungsverfahren handelt, das auf das ganze Bild bezogen ist, entstehen lokal, durch das Korrekturverfahren bedingt, kleine Abweichungen gegenüber der topographischen Landeskarte.

11.6.2 MCLAS 42 Kategorien / 8 Kanäle

Nach Schaffung der geometrischen Voraussetzungen konnten nun die Klassifikationen dem transparenten Bodenbild in einem photographischen Verfahren überlagert werden.

Dabei muss aber zuerst auf das Problem der unterschiedlichen Darstellungsart von Bodenbild und Klassifikation hingewiesen werden. Während die Abgrenzungslinien den Rändern der Schnee-Eis-Flächen im Bodenbild genau folgen können, werden bei den Klassifikationen Grenzen, die nicht in der X- oder Y-Richtung verlaufen, treppenartig dargestellt (Kap. E.10.1). Dieser Unterschied verunmöglicht eine genaue Ueberlagerung der beiden Vorlagen. Abb. 7 zeigt das photographische Produkt dieser Ueberlagerung.



Legende:

- durchgezogene Linie =
Schnee-Eis-Fläche des
Bodenbildes
- schraffierte Fläche =
Wolken
- grau = Schnee-Eis-Fläche
der Klassifikation
- weiss = schneefreie Zone
der Klassifikation
- Massstab = ca. 1:210'000

Abb. 7: Bildvergleich MCLAS 42 Kat/8 Kan - Klassifikation
mit dem Bodenbild im Testgebiet

Auf Kosten einer übersichtlichen Darstellung (Kap. E.11.5) wurde beim ersten Vergleich die MCLAS 42 Kat/8 Kan-Klassifikation nicht geglättet (Abb. 3). Die unruhige, aber dem effektiven Klassifikationsergebnis entsprechende Darstellung erlaubt, kleine Fehler noch im Detail zu erkennen. Im Gegensatz zu der erheblichen Reduktion der "schneefreien" Kategorien bei der DCLAS 23 Kat/5 Kan- und MCLAS 23 Kat/5 Kan-Klassifikation (Kap. E.6.4.2), wurden bei dieser Klassifikation noch alle Kategorien verwendet. Dieser Umstand erlaubt eine Untersuchung der das Klassifikationsergebnis negativ beeinflussenden Kategorien.

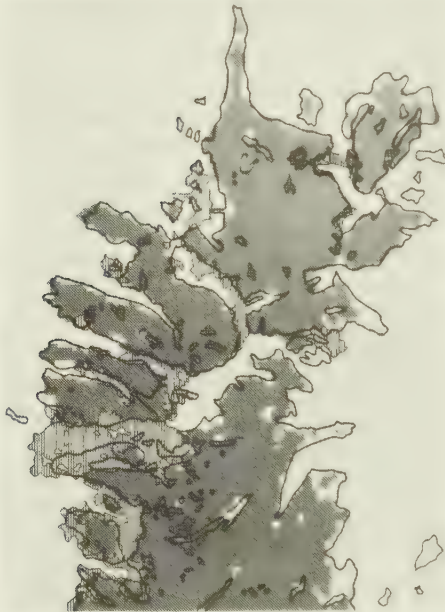
Fehler treten in dieser Klassifikation hauptsächlich auf der östlichen Seite der Schnee-Eis-Fläche auf. Dort sind an den Gletscherenden die grössten Abweichungen Bodenbild-Klassifikation festzustellen, wobei grundsätzlich zu wenig Schnee-Eis klassiert wurde. Wenn man die Landeskarte sowie die Luftbilder betrachtet, erstaunt das wenig, denn die Gletscherzungen sind hier z.T. so extrem verschmutzt, dass nur noch durch sekundäre Indikatoren feststellbar ist, dass unter Geröll, Schotter und Moränenmaterial Schnee oder Eis liegt. Eine spektrale Differenzierung zur Schotterkategorie ist ausgeschlossen.

Die fehlklassierten Pixel im Innern der Schneeflächen wurden häufig statt einer Schneekategorie entweder den Mischkategorien "ausapernder Schnee" und "Wolkenrand/schneefreie Zone" oder aber auch einer hellen Felskategorie zugeordnet. Untersuchungen ergaben, dass diese Pixel häufig im Halbschatten liegen. Da es aber praktisch unmöglich ist, aus einzelnen Pixeln eine für die statistische Auswertung brauchbare Kategorie zusammenzustellen, musste darauf verzichtet werden. Solche, aus Einzelpixeln zusammengesetzte Kategorien, bergen die Gefahr in sich, dass wohl die Fehlerpixel in der Klassifikation eliminiert werden können, dafür aber an anderen Stellen neue Falschklassierungen entstehen (Bsp. Fels wird dann plötzlich als Schnee klassiert).

Trotz schwieriger Bedingungen (Schnee-Firn-Eis-Uebergänge, extreme Schnee-Verschmutzung, Hochgebirgsrelief) konnte aber dennoch eine qualitativ gute Schnee-Eis-Klassifikation hergestellt werden. Das Ergebnis der relativ teuren MCLAS 42 Kat/8 Kan-Klassifikation zeigt, wie genau mit den zur Verfügung stehenden Mitteln im Testgebiet überhaupt digital klassiert werden konnte.

11.6.3 MCLAS 23 Klassen / 5 Kanäle

Das in Abb. 8 dargestellte Ergebnis der MCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikation ist im Gegensatz zum Ergebnis der MCLAS 42 Kat/8 Kan-Klassifikation (Abb. 7) geglättet.



Legende:

durchgezogene Linie =
Schnee-Eis-Fläche des
Bodenbildes

schrattierte Fläche =
Wolken

grau = Schnee-Eis-Fläche
der Klassifikation

weiss = schneefreie Zone
der Klassifikation

Massstab = ca. 1:210'000



Abb. 8: Bildvergleich MCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikation mit dem Bodenbild

Das Ergebnis zeigt wie bei der MCLAS 42 Kat/8 Kan-Klassifikation eine gute Uebereinstimmung. Die Abweichungen sind hauptsächlich wieder auf den stark abfallenden, stark verschmutzten, östlichen Gletscherzungen zu beobachten. Im Innern der Schneeflächen wurde im Gegensatz zum MCLAS 42 Kat/8 Kan häufig zuviel Schnee klassiert. Dieser Umstand ist durch den Glättvorgang zu erklären, der generalisierend wirkt. Die kleinen Wolkenschleier, die bei der ursprünglichen Klassifikation noch zu sehen sind, werden beim Glätten dem Schnee zugeordnet.

11.6.4 DCLAS 23 Klassen / 5 Kanäle

Abb. 9 zeigt in einem Vergleich das Bodenbild und das Ergebnis der geglätteten DCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikation

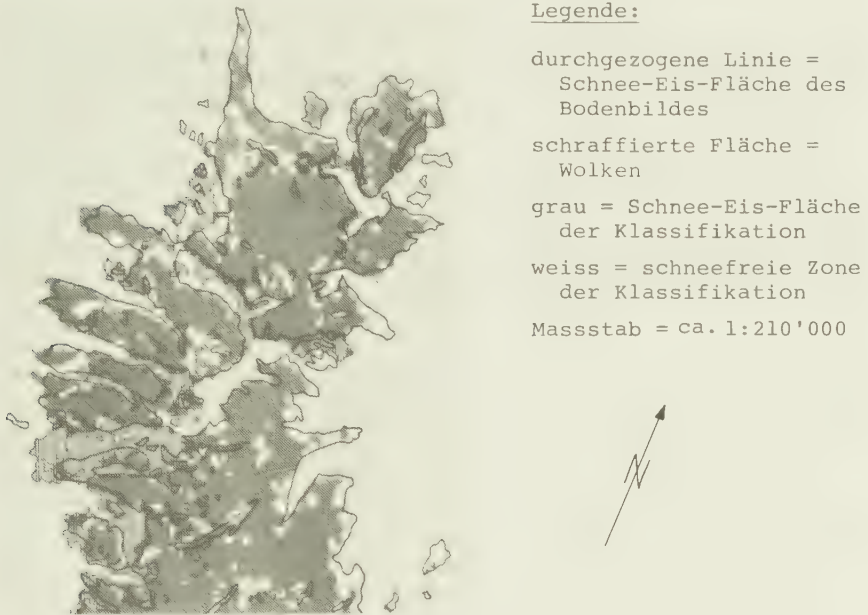


Abb. 9: Vergleich DCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikation mit dem Bodenbild

Im Vergleich zum MCLAS 42 Kat/8 Kan zeigen sich bei dieser Klassifikation schon bedeutendere Abweichungen. Dennoch dürfte dieses Resultat gesamthaft den Anforderungen für den Einbezug in ein Abfluss-Modell noch genügen.

Neben den schon bekannten Abweichungen an den Gletscherenden treten hier an einigen anderen Stellen weisse Flecken auf. Diese fehlklassierten Pixel gehören fast alle der Wolkenkategorie 16 an. Zusätzliche Klassifikationen im Testgebiet ergaben, dass der Einfluss dieser Wolkenkategorie mit der "Threshold"-Option eingeschränkt und der Fehler so behoben werden könnte.

Werden aber Klassifikationen in anderen Teilen des Untersuchungsgebietes durchgeführt, so tritt in Gebieten mit Cumulus-Wolken plötzlich die Schneekategorie 10 auf, obwohl es dort gar keinen Schnee haben kann. Dieser durch die Wolkenkategorie 16 und Schneekategorie 10 bewirkte Fehler muss also im Rahmen des gesamten Untersuchungsgebietes gesehen werden.

Es zeigte sich, dass bei Verwendung von nur fünf Kanälen diese beiden Kategorien nicht mehr vollständig trennbar sind. Mit Versuchsklassifikationen, bei denen die "Threshold"-Werte dieser zwei Kategorien verschoben wurden, musste ein Mittelweg gefunden werden, um den Fehler bei beiden Kategorien in Grenzen halten zu können.

Gerade dieses Beispiel hat einmal mehr bestätigt, wie wichtig es im Hinblick auf grossräumige Klassifikationen ist, Testversuche an verschiedenen Stellen des Untersuchungsgebietes durchzuführen, damit die Parameter so gesetzt werden können, dass sie überall ihre Gültigkeit haben.

12. Digitaler Vergleich zweier Klassifikationen

Was in Kap. E.11.4 vermutet, wurde im vorigen Kapitel bestätigt: Trotz praktisch gleichen quantitativen Resultaten (Unterschiede maximal $\sim 0.7 \text{ km}^2$), unterscheiden sich die einzelnen Klassifikationen qualitativ z.T. beträchtlich.

Als Zusatz zu dem in Kap. E.11 gemachten analogen Vergleich soll noch untersucht werden, wie gut die Klassifikationen bei einem direkten automatisierten Flächenvergleich übereinstimmen.

Zu diesem Zwecke wurden immer zwei Klassifikationen mit dem PPD-Programm miteinander verglichen. Die Methode ist dieselbe, die schon in Kap. E. 10 angewandt wurde. Im Gegensatz zu jenem Digitalisierungsverfahren stimmen aber die Koordinaten der beiden Klassifikationen vollständig überein, so dass der Grund für nicht übereinstimmende Pixel nicht durch fehlende Ueberlagerungsgenauigkeit, sondern allein durch Klassifikationsunterschiede gegeben ist.

Vorerst mussten die zu untersuchenden Klassifikationen in dem Sinn modifiziert werden, als nur die zwei Hauptkategorien "Schnee-Eis" und "schneefreie Zone" in Betracht gezogen werden durften. Beim Vergleichsverfahren wurden dann Pixel, die nicht in beiden Vorlagen als "Schnee-Eis" klassiert wurden, je nach dem, in welcher der beiden Klassifikationen sie nicht übereinstimmten, mit einem + resp. - Zeichen gekennzeichnet. Im Photomation-Bild sind sie als hell- resp. dunkelgraue Bildelemente dargestellt.

Verglichen wurde einerseits die MCLAS 42 Kat/8 Kan- mit der MCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikation (Abb. 10a, Tab. 26a) und andererseits die MCLAS 23 Kl/5 Kan- mit der DCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikation (Abb. 10b, Tab. 26b). Die Resultatsübersicht (Tab. 26) zeigt, dass die Abweichungen beim Klassifikationsvergleich DCLAS 23 Kl/5 Kan - MCLAS 23 Kl/5 Kan relativ gross sind, obwohl beim quantitativen Vergleich der beiden nur geringe Unterschiede festgestellt werden konnten (Kap. E.11.2).

Als Schlussfolgerung muss klar formuliert werden, dass die in der Literatur häufig in Zahlentabellen aufgezeichneten Klassifikationsresultate auch immer hinsichtlich der räumlichen Verteilung überprüft werden sollten. Wenn das nicht möglich ist, müssen Resultate mit gebührender Vorsicht behandelt werden.



Abb. 10: Digitaler Klassifikationsvergleich
a) MCLAS 42 Kat/8 Kan - MCLAS 23 Kl/5 Kan
b) MCLAS 23 Kl/5 Kan - DCLAS 23 Kl/5 Kan
Massstab ca. 1:350'000

Legende:

schwarz = Abweichungen der
MCLAS 42 Kat/8 Kan-Klassi-
fikation

grau = Abweichungen der
MCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassi-
fikation

Legende:

schwarz = Abweichungen der
MCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassi-
fikation

grau = Abweichungen der
DCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassi-
fikation

a)	Anzahl	%
übereinstimmende	33'977	98.32
Abweichungen MCLAS 42 Kat/8 Kan	198	0.57
Abweichungen MCLAS 23 Kl/5 Kan	385	1.11
Total	34'560	100.00
b)	Anzahl	%
übereinstimmende	33'004	95.50
Abweichungen DCLAS 23 Kl/5 Kan	860	2.49
Abweichungen MCLAS 23 Kl/5 Kan	696	2.01
Total	34'560	100.00

Tab. 26: Resultate des digitalen Klassifikationsvergleichs

13. Zeitaufwand, Kosten

Das Hauptziel dieser Arbeit lag in der Reduktion des Zeitaufwandes und damit der Kosten für eine Schnee-Eis-Klassifikation, ohne dabei das Ergebnis gegenüber den anfänglichen, überdimensionierten Klassifikationen signifikant schlechter werden zu lassen.

Die Arbeit hat gezeigt, dass es in der momentanen Versuchsphase unmöglich ist, über den gesamten Arbeitsablauf eine Kostenrechnung aufzustellen, da bei jedem Arbeitsschritt eine z.T. sehr grosse Anzahl von Versuchsreihen durchgeführt werden musste, um neue Programme oder Gedankengänge auszutesten.

Die Zahlen, die nachfolgend veröffentlicht werden, beinhalten deshalb nur die Kosten für die Herstellung des jeweiligen Endergebnisses. Der grosse Aufwand für die Vorarbeiten, Versuchsreihen etc., der nötig war, lässt sich nicht in Zahlen festlegen.

Der gesamte Verarbeitungsprozess der überwachten Verfahren kann grob in zwei Verarbeitungsstufen aufgeteilt werden, in die statistische Vorverarbeitung und die eigentliche Klassifikation. ¹⁾ Tab. 27 gibt einen Ueberblick über die CPU-Zeit und die Kosten dieser beiden Verarbeitungsstufen.

1. Statistische Vorverarbeitung

	CPU-Zeit	Kosten
Endgültige Statistikanalyse mit 42 Kategorien und 12 Kanälen	32.8 sek	65 Fr.
Statistikanalyse mit 23 Klassen und 5 Kanälen	6.2 sek	15 Fr.

2. Klassifikationen (im Testgebiet 160 Zeilen x 216 Kolonnen = 34'560 Pixel)

	CPU-Zeit	Kosten
MCLAS 42 Kat/8 Kan	174 sek	151 Fr.
DCLAS 42 Kat/12 Kan	34.8 sek	33 Fr.
MCLAS 23 K1/6 Kan	68.5 sek	62 Fr.
DCLAS 23 K1/6 Kan	16.9 sek	18 Fr.
MCLAS 23 K1/5 Kan	56.6 sek	52 Fr.
DCLAS 23 K1/5 Kan	15.8 sek	17 Fr.

Tab. 27: CPU-Zeit- und Kostentabelle für die statistische Vorverarbeitung und die Erstellung der einzelnen Klassifikationen

1) Unter Kosten werden die Beträge verstanden, wie sie vom Rechenzentrum der Universität Zürich in Rechnung gestellt werden.

Tab. 27 zeigt einerseits auf, wie stark sich der Unterschied des Rechenzeitaufwandes zwischen dem DCLAS- und MCLAS-Algorithmus ausprägt, andererseits wird ersichtlich, wie beträchtlich mit der Kanal- und Kategorienreduktion Rechenzeit eingespart werden kann.

In Tab. 28 und 29 werden in einem CPU-Zeit-Vergleich die Fragen geklärt, um wieviel Prozent der Rechenzeitaufwand zwischen der Ausgangsklassifikation und den entsprechenden Kanal-/Kategorien-Reduktionen bei gleichem Algorithmus sowie zwischen den verschiedenen Algorithmen mit reduzierter Kanal-/Kategorien-Konfiguration vermindert werden kann.

DCLAS 42 Kat/12 Kan	100 %	MCLAS 42 Kat/8 Kan	100 %
DCLAS 23 K1/6 Kan	48.6 %	MCLAS 23 K1/6 Kan	39.4 %
DCLAS 23 K1/5 Kan	45.4 %	MCLAS 23 K1/5 Kan	32.5 %

Tab. 28: Prozentuale Einsparung in der CPU-Zeit

MCLAS 23 K1/6 Kan	100 %	MCLAS 23 K1/5 Kan	100 %
DCLAS 23 K1/6 Kan	24.7 %	DCLAS 23 K1/5 Kan	27.9 %

Tab. 29: Prozentualer Vergleich der CPU-Zeit von MCLAS-DCLAS

Obwohl bei den Ausgangsklassifikationen beim DCLAS im Gegensatz zum MCLAS (8 Kanäle) alle zwölf Kanäle verwendet werden konnten, liegt die CPU-Zeit um 80 % niedriger. Mit den erarbeiteten Reduktionsverfahren ist es gelungen, den ursprünglichen Zeitaufwand beim DCLAS um über die Hälfte, beim MCLAS sogar um 2/3 zu vermindern, ohne dass sich die Genauigkeit der Klassifikationsresultate massgebend verschlechtert hätte. Die Vergleichszahlen zeigen zudem eindeutig, dass wegen der gewaltigen Differenzen in der CPU-Zeit für operationelle Schnee-Eis-Klassifikationen dem DCLAS-Algorithmus der Vorzug eingeräumt werden muss.

Im Zusammenhang mit der Besprechung von Rechenzeit-Einsparungen muss an dieser Stelle nochmals erwähnt werden, dass mit Inkrement 2 (Kap. E.8) der Zeitaufwand ohne signifikante Verschlechterung der Klassifikationsergebnisse zusätzlich um den Faktor 3 verkleinert werden kann.

14. Grossflächige Kartierungen

14.1 Einleitung

In dieser Arbeit soll, wie es in der Zielsetzung formuliert wurde, eine grossräumige Schneeflächenkartierung angestrebt werden. Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich aber, mit Ausnahme der Stichprobensuche, ausschliesslich auf das Testgebiet, also auf einen sehr kleinen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes (Kap. C.2). Um neue Programme zu testen oder Arbeitshypothesen zu überprüfen, war es nicht zweckmässig, grössere Gebiete zu berücksichtigen. Zusätzlich kam hinzu, dass zu Beginn dieser Arbeit mit 42 Kategorien und 12 Kanälen selbst in kleinen Gebietseinheiten die Datenmenge so gross war, dass nicht mehr effizient gearbeitet werden konnte.

Werden die Untersuchungen in einem relativ kleinen Gebiet entwickelt, so muss man sich immer bewusst sein, dass gewisse Eigenheiten dieser Zone nicht unbedingt auf eine grossflächige Region übertragen werden dürfen (Kap. E.3.3). Es besteht die Gefahr, dass beim Klassieren die Parameter, mit denen der Interpret die Qualität der Ergebnisse steuern kann, an Allgemeingültigkeit verlieren, weil sie speziell für diese bestimmten Gebiete massgeschneidert wurden. Deshalb müssen solche spezifischen Eingriffe unterlassen werden, wenn die Verfahren auch in grösseren Regionen verwendet werden sollen. Auf Grund dieser Kenntnisse stammen die in dieser Arbeit benutzten Stichproben aus dem gesamten Untersuchungsgebiet und nicht nur aus dem kleinen Testgebiet.

In einem nächsten Arbeitsschritt soll daher überprüft werden, ob die in unserem Testgebiet festgesetzten Klassifikationsparameter auf eine grössere Region übertragen werden können. Aus finanztechnischen Gründen war es aber nicht ratsam, unmittelbar das gesamte Untersuchungsgebiet zu klassieren und das Ergebnis auf seine Genauigkeit hin zu prüfen.

Vorerst wurde darum eine Fläche herausgesucht, die nicht zu gross ist, die sich aber dennoch lagemässig und vom Umfang her klar vom Testgebiet unterscheidet. In diesem Gebiet müssen nun Abweichungen, die sich durch die Festsetzung der Klassifikationsparameter im Testgebiet ergeben haben, wieder ausgeglichen werden.

14.2 Ueberprüfung der im erweiterten Testgebiet festgelegten Klassifikationsparameter

Die Parameter der MCLAS- und DCLAS-Algorithmen wurden in einem grösseren Gebiet auf ihre Tauglichkeit für die Schneekartierung geprüft, wobei nur noch mit reduzierter Kanal- und Kategorienzahl gearbeitet wurde. Das ausgewählte Gebiet entspricht ungefähr dem Mattertal mit den umgebenden Bergzügen (Abb. 1). Es umfasst im MSS-Bild 540 Linien und 488 Kolonnen, was gesamthaft 263'520 Pixel ergibt. Dies entspricht einer Fläche von 1'281 km². Leider konnte in dieser Region die Genauigkeit der einzelnen Klassifikationen nur noch stichprobenweise überprüft werden, weil davon nur teilweise aktuelle Luftbilder existierten. Aus den in Kap. E.15 beschriebenen Gründen werden auch in diesem Arbeitsschritt noch die 6-Kanal-Klassifikationen beibehalten. Abb. 11 und Tab. 30 zeigen die Ergebnisse der MCLAS 23 Kl/6 Kan und 5 Kan sowie der DCLAS 23 Kl/6 Kan und 5 Kan-Klassifikation.



Abb. 11: Ergebnisse der Klassifikationen im Mattertal

- a) MCLAS 23Kl/6Kan b) MCLAS 23Kl/5Kan
c) DCLAS 23Kl/6Kan d) DCLAS 23Kl/5Kan

Darstellung in den zwei Hauptkategorien Schnee-Eis (schwarz) und schneefreie Zone (weiss). Massstab ca. 1:390'000

Kat. Nr.	MCLAS 6 Kan %	DCLAS 6 Kan %	MCLAS 5 Kan %	DCLAS 5 Kan %
1	4.84	4.87	5.21	4.83
2	5.01	5.31	4.89	5.16
4	1.92	1.90	1.30	2.00
5	1.44	1.01	1.23	1.18
6	2.59	2.20	2.61	2.44
7	1.78	1.90	1.82	1.92
8	0.35	0.49	0.54	0.71
9	1.18	1.23	1.86	0.92
10	1.25	1.44	1.08	1.51
11	0.52	0.56	0.52	0.58
12	0.22	0.24	0.26	0.07
13	0.38	0.47	0.39	0.45
Total	21.48	21.67	21.66	21.77

Tab. 30: Resultatsübersicht der vier Klassifikationen im erweiterten Testgebiet (Gebiet des Mattertales). Es sind nur die für diese Arbeit relevanten Schnee-Eis-Kategorien aufgeführt. Angaben in Prozent des gesamten, erweiterten Testgebietes.

Die quantitative Resultatsübersicht zeigt wieder eine erstaunlich geringe Streuung zwischen den einzelnen Klassifikationen (maximale Abweichung 1.4 %). Die räumliche Analyse der Schnee-Eis-Flächen zeigt hingegen dieselben Fehler, wie sie bei den Klassifikationen des Testgebietes auftreten. Die Schnee-Eis-Flächen sind beim DCLAS an gewissen Stellen gegenüber den MCLAS-Klassifikationen etwas lichter. Daneben finden sich bei der DCLAS-Klassifikation ausserhalb der Schnee-Eis-Flächen ganz fein verstreut, einzelne "Schnee-Pixel". Der Grund für diesen Fehler liegt darin, dass sich mit dem DCLAS-Algorithmus die Schneekategorie 10 und die Wolkenkategorie 16 nicht vollumfänglich trennen lassen (Kap. E.11.6.4).

Abschliessend soll auch bei diesen Klassifikationen eine Uebersicht über die Computerzeit sowie die Kosten gegeben werden, wobei wiederum CPU-Zeit und Kosten nur für die effektive Klassifikation angegeben werden können (Tab. 31).

	CPU-Zeit	Kosten
DCLAS 23 K1/6 Kan	120 sek	108 Fr.
DCLAS 23 K1/5 Kan	112 sek	101 Fr.
MCLAS 23 K1/6 Kan	482 sek	411 Fr.
MCLAS 23 K1/5 Kan	394 sek	338 Fr.

Tab. 31: CPU-Zeit und Kosten der Klassifikationen im Gebiet des Mattertales

Ein Kostenvergleich der einzelnen Klassifikationen zeigt deutlich, dass die Unterschiede zwischen den DCLAS- und MCLAS-Klassifikationen bei einer grösseren klassierten Fläche stark anwachsen.

14.3 Klassifikation des gesamten Untersuchungsgebietes

In einem letzten Schritt wurde das gesamte Untersuchungsgebiet (7'773 km²) klassiert, was heisst, dass auf dem MSS-Bild 1'025 Kolonnen x 1'560 Linien, gesamthaft also 1'599'000 Pixel zugeordnet werden mussten. Aus kostentechnischen Gründen wurde als Klassifikationsgrundlage nur noch der MCLAS-Algorithmus mit 23 Klassen und 5 Kanälen sowie der DCLAS-Algorithmus mit 23 Klassen und 5 Kanälen verwendet. Wegen der grossen Datenmenge war es nur noch möglich, im Stapelbetrieb zu arbeiten. Die Ergebnisse der zwei Klassifikationen sind in Tab. 32 aufgezeichnet. Abb. 12 zeigt das Gesamtergebnis einer grossräumigen Schneekartierung mit dem DCLAS-Algorithmus. Da die Unterschiede zwischen den DCLAS- und MCLAS-Klassifikationsergebnissen sehr klein sind, wurde auf die Darstellung des MCLAS-Klassifikationsergebnisses verzichtet.

Kat. Nr.	DCLAS 5 Kan		MCLAS 5 Kan	
	Anzahl Pixel	%	Anzahl Pixel	%
1	21'718	1.36	24'144	1.51
2	17'916	1.12	16'522	1.03
4	8'039	0.50	6'293	0.39
5	4'432	0.28	5'157	0.32
6	8'940	0.56	10'772	0.67
7	17'285	1.08	11'564	0.72
8	2'298	0.14	2'536	0.16
9	7'060	0.44	8'903	0.56
10	6'650	0.42	5'479	0.34
11	2'040	0.13	2'299	0.14
12	1'302	0.08	2'138	0.13
13	2'140	0.13	1'575	0.10
Total	99'820	6.24	97'382	6.07

Tab. 32: Ergebnisse der DCLAS- und MCLAS 23 Kl/5 Kan-Klassifikationen des Untersuchungsgebietes. Es sind nur die Schnee-Eis-Kategorien aufgeführt. Angaben in Prozent des gesamten Untersuchungsgebietes.

Abb. 12:

Ergebnis der DCLAS 23 K1/5 Kan-Klassifikation des gesamten Untersuchungsgebietes.
Darstellung in den zwei Hauptkategorien Schnee-Eis (schwarz) und schneefreie Zone
(weiss). Massstab ca. 1:390'000.



Nur auf die Schneefläche bezogen (= 100 %), beträgt die Abweichung der zwei Klassifikationsresultate 2.8 %. Sie wird zum grössten Teil von den Kategorien 7 und 10, beides "verschmutzte Schnee-Eis"-Kategorien verschuldet. Analoge Photointerpretationen haben gezeigt, dass diese Kategorien spektral gesehen Mischkategorien darstellen, denn von leicht verschmutztem bis stark verschmutztem Schnee-Eis kommen alle möglichen Zwischenstufen vor. Es ist praktisch nicht möglich, die "Threshold"-Werte beim DCLAS für diese Mischkategorie so genau zu setzen, dass sie mit denen des MCLAS-Algorithmus übereinstimmen. Die Abweichungen der anderen Kategorien zwischen den beiden Klassifikationen sind minimal.

14.3.1 Qualitative Prüfung der Klassifikationen mit topographischen Landeskarten und S 190 A - Photographien

Die Genauigkeit der klassierten Schneeflächen im Untersuchungsgebiet konnte nur noch mit Hilfe der Landeskarten im Massstab 1:25'000 sowie den S 190 A-Photographien überprüft werden. Diese Unterlagen erlaubten aber einzig, gröbere Fehler zu entdecken. Wie schon bei der kleinflächigen Untersuchung wurde die Schnee-Eis-Fläche eher zu klein klassiert (Kap. E.11.3). Neben der Kategorie 40 "ausapernder Schnee" sind, wie oben, die Kategorien 7 und 10 "Schnee-Eis, stark verschmutzt, SO" dafür verantwortlich.

Gesamthaft kann der Schluss gezogen werden, dass sowohl mit dem MCLAS- als auch mit dem DCLAS-Algorithmus mit 23 Klassen und 5 Kanälen auch über ein grosses Gebiet eine gute Schnee-Eis-Klassifikation ausgeführt werden kann.

Bei derartig grossen Datenmengen wird der kostenmässige Unterschied eines DCLAS- und eines MCLAS-Algorithmus aber offenkundig (Tab. 33). Für grossflächige, operationelle Schneeflächenkartierungen kann deshalb nur der DCLAS-Algorithmus in Frage kommen.

	CPU-Zeit	Kosten
DCLAS 23 Kl/5 Kan	10 min 18 sek	522 Fr.
MCLAS 23 Kl/5 Kan	39 min 12 sek	1'994 Fr.

Tab. 33: CPU-Zeit und Kosten der zwei Klassifikationen des Untersuchungsgebietes

15. Problematik der Schattenpartien

Die Erfassung von Schneeeinformationen, die durch Reliefschatten maskiert sind, konnten in früheren Untersuchungen nicht umfassend gelöst werden. Dank dem grossen Angebot an Spektralkanälen, die in dieser Arbeit zur Verfügung standen, konnte dieses Problem aber eingehend untersucht werden.

Die Analyse dieser Frage ergab, dass es möglich ist, Schnee-Eis-Flächen auch in Schattenlage mit Hilfe von multispektralen Informationen von den umgebenden "schneefreien Zonen" zu separieren. Es muss aber gegenüber einem schattenlosen Untersuchungsgebiet ein bedeutender Mehraufwand an Spektralkanälen eingesetzt werden, was die Klassifikation erheblich verteuert. Dieses Ergebnis wurde durch Klassifikationen ermittelt, bei denen alle vier Schnee-Eis-Kategorien (Tab. 16) in Schattenlage aus dem Verfahren ausgesondert wurden. Mit den 19 noch verbliebenen Kategorien wurde vorerst mit Hilfe des Kanalselektionsprogrammes die Abfolge der günstigsten Kanäle bestimmt. Die schrittweise Diskriminanzanalyse ergab dabei das gleiche Resultat wie bei der Verwendung der Schnee-Eis-Schattenkategorien (0.68-0.76 μm ; 1.55-1.75 μm ; 0.46-0.51 μm ; 0.78-0.88 μm ; 0.56-0.61 μm ; 10.2-12.5 μm).

In einer Abfolge von Stichprobenklassifikationen, beginnend mit sechs Kanälen, absteigend bis zwei Kanäle, wurde anschliessend mit dem MCLAS-Algorithmus geprüft, wieviele Kanäle noch nötig sind, um ein Gebiet ohne Schnee im Schatten zu klassieren.

Tab. 34 zeigt die Ergebnisse der Stichprobenklassifikation. Es sind dabei nur die Schnee-Eis-Kategorien berücksichtigt.

Aus allen fünf Stichprobenklassifikationen in Tab. 34 ist zu entnehmen, dass ohne Schatteneinfluss theoretisch nur zwei Kanäle (0.68-0.78 μm und 1.55-1.75 μm [Wolkenseparierung]) notwendig sind, um eine Trennung der Hauptkategorie "Schnee-Eis" von der Hauptkategorie "schneefreie Zone" mit genügender Genauigkeit zu gewährleisten. Hingegen ist es bei der Verwendung von drei, besonders aber von nur zwei Kanälen nicht mehr zulässig, verschiedene Schneetypen zu unterscheiden, weil innerhalb der Hauptgruppe Schnee-Eis keine genügende Trennung der einzelnen Kategorien möglich ist.

Kat. Nr.	6 Kanäle			5 Kanäle		
	1 %	2 %	3 %	1 %	2 %	3 %
1	97.7	1.7	0.6	97.7	1.7	0.6
2	98.3	1.1	0.6	98.3	1.1	0.6
4	100			98.1	1.9	
5	96.4	3.6		94.6	5.4	
6	98.9	0.6	0.5	98.9	0.6	0.5
7	100			100		
8	100			100		
9	100			100		

Kat. Nr.	4 Kanäle			3 Kanäle		
	1 %	2 %	3 %	1 %	2 %	3 %
1	98.3	1.7		91.3	8.7	
2	98.3	1.1	0.6	91.6	7.8	0.6
4	98.1	1.9		98.1	1.9	
5	96.4	3.6		98.2	1.8	
6	98.9	0.6	0.5	96.2	3.3	0.5
7	100			93.8	3.1	3.1
8	95.2	4.8		85.7	14.3	
9	81.8	18.2		54.6	45.4	

Kat. Nr.	2 Kanäle		
	1 %	2 %	3 %
1	89.6	10.4	
2	94.4	5.0	0.6
4	81.1	18.9	
5	34.6	65.4	
6	78.1	21.3	0.6
7	79.7	15.6	4.7
8	23.8	76.2	
9	90.9	9.1	

Tab. 34: Ergebnisse der Stichprobenklassifikation MCLAS:
Schnee-Eis-Hauptkategorie ohne Schnee-Eis-Katego-
rien in Schattenlage

Legende:

- 1 = richtig klassiert
- 2 = "Fehler" innerhalb der eigenen Hauptkategorie
- 3 = effektive Fehlzuordnungen in die Hauptkatego-
rie "schneefreie Zone"

In einem zweiten Schritt wurden im Testgebiet Klassifikationen mit dem MCLAS-Algorithmus (ohne die Schnee-Eiskategorien in Schattenlage) durchgeführt, wobei mit unterschiedlicher Kanalzahl (beginnend mit sechs Kanälen, absteigend bis zwei Kanäle) gearbeitet wurde. Tab. 35 gibt eine Uebersicht über die Resultate der MCLAS-Klassifikationen. Zum Vergleich wurde auch die Normalklassifikation (Klassifikation mit Einbezug der Schnee-Eis-Kategorien in Schattenlage) in die Tab. 35 aufgenommen.

urspr. Kat.Nr.	Normal- Klass. %	Klass. 6 Kan %	Klass. 5 Kan %	Klass. 4 Kan %	Klass. 3 Kan %	Klass. 2 Kan %
1	4.48	4.48	4.47	4.83	1.88	2.02
2	3.28	3.28	3.30	3.19	6.52	7.33
4	2.40	2.40	2.49	1.77	1.72	1.78
5	1.11	1.11	1.04	0.91	1.04	0.59
6	1.96	2.17	1.85	1.90	1.73	1.80
7	2.23	2.66	2.39	2.36	2.12	2.31
8	0.36	0.36	0.44	0.76	1.18	1.35
9	1.13	1.13	1.17	1.73	1.27	0.88
Total	16.95	17.59	17.15	17.45	17.46	18.06

Tab. 35: Ergebnisse der Klassifikationen im Testgebiet ohne die Schnee-Eis-Kategorien in Schattenlage. Die Klassifikationen wurden mit dem MCLAS-Algorithmus ausgeführt, beginnend mit sechs Kanälen, absteigend bis zwei Kanäle.

Gegenüber der Normalklassifikation hat sich bei allen anderen Klassifikationen der "Schnee-Sonne"-Anteil vergrößert. Das ist dadurch zu erklären, dass die ursprünglichen Schnee-Schatten-Stellen (aus der Normalklassifikation) nicht nur von schneefreien Kategorien, sondern auch von Schnee-Eis-Kategorien in Sonnenlage (vor allem verschmutzter Schnee) eingenommen wurde.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsache darf auch die 2-Kanal-Klassifikation noch als durchaus genügend anerkannt werden (nur 6.5 % Abweichung gegenüber der Normalklassifikation).

Nach der Stichprobenanalyse mit allen Schnee-Eis-Kategorien (Kap. E.5.3) wurde festgehalten, dass, um eine gute Klassifikation zu erhalten, sechs Kanäle nötig sind.

Um die Schnee-Eis-Kategorien in Schattenlage sauber klassieren zu können, mussten also zusätzlich vier Spektralkanäle zu den zwei oben erwähnten Kanälen hinzugefügt werden, obwohl während der Datenaufnahme nur ungefähr 9 % der gesamten Schneefläche im Testgebiet im Schatten lagen. Diesem Missverhältnis wurde in unserer Arbeit insofern Rechnung getragen, als am Schluss nur noch mit fünf Kanälen gearbeitet wurde, weil diejenigen Kategorien, die bei der Stichprobenanalyse den Fehler ansteigen liessen, ausschliesslich aus den Schnee-Eis-Kategorien in Schattenlage stammten.

Bei der Bearbeitung von Daten, bei denen der prozentuale Anteil der Schattenzone über ein grösseres Gebiet hinweg so klein ist wie in dieser Arbeit, ist es opportun, nur mit fünf Kanälen zu arbeiten. Bei einem grösseren Anteil der Schattenflächen muss aber die 6-Kanal-Variante angewandt werden, wenn der Fehler der Schnee-Eis-Schattenkategorien in Grenzen gehalten werden soll.

16. Uebersicht über die verwendeten Computerprogramme

Alle Arbeiten wurden am Rechenzentrum der Universität Zürich mit Hilfe des IBIS-Programmpaketes (interaktives Interpretationssystem) durchgeführt. IBIS wurde für die Analyse multispektraler Satellitenbilder entwickelt, kann grundsätzlich aber für jede Art digitaler Daten verwendet werden.

Je nach Problemstellung können zwei verschiedene Verarbeitungsmöglichkeiten angewendet werden. Im interaktiven Betrieb kann bei kleinem Datenanfall schnell und konstruktiv gearbeitet werden. Bei der Verarbeitung von grossen Bildausschnitten ist der Stapelbetrieb dagegen vorzuziehen.

Das in Fig. 21 aufgezeichnete Verarbeitungsschema gibt einen Ueberblick über die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten, die einem Benützer der IBIS-Programmbibliothek offen stehen. Das System ist so konzipiert, dass ohne zusätzlichen Mehraufwand neue Programmteile ins bestehende Programmpaket eingebaut werden können (FASLER, 1978).

Das am CDC-Computer der ETH Zürich verwendete CLUS-Programm entstammt der Programmbibliothek PHOTOS, das von Dr.K.SEIDEL vom Institut für Kommunikationstechnik ETH Zürich, entwickelt wurde.

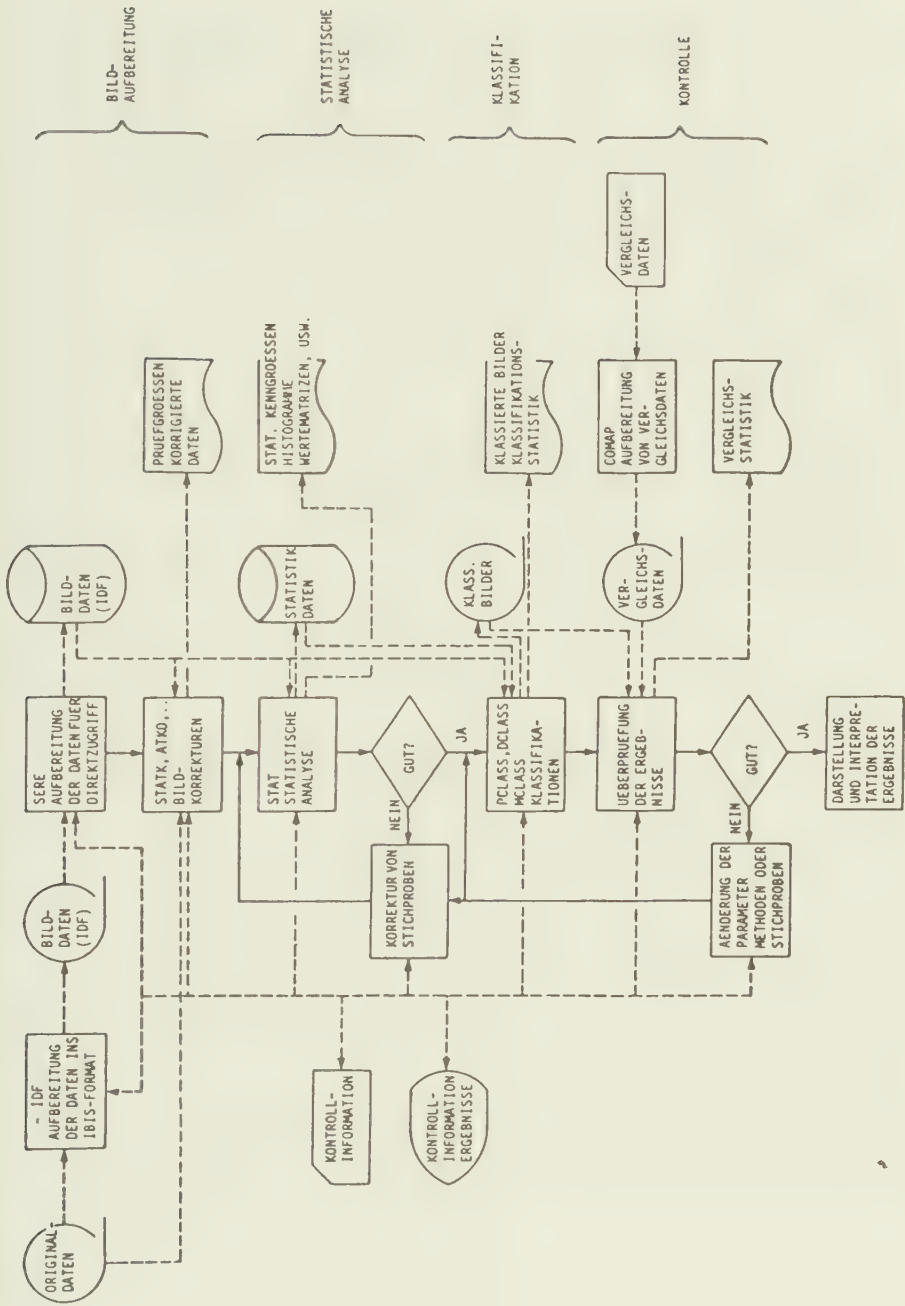


Fig. 21: IBIS (Interaktives Bild-Interpretations-System) -Verarbeitungsschema (FASLER, 1978)

F. ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN UND AUSBLICK

Die in der Einleitung (Kap. A.1) aufgeworfene Frage, ob den sich gegenwärtig oder künftig in Umlauf befindenden Erderkundungssatelliten die optimalen Spektralkanäle für Schneekartierungen zur Verfügung stehen, muss noch geklärt werden. Aus Kap. E.5.2 geht hervor, dass sich die folgenden Wellenlängenbereiche für Schnee-Eis-Klassifikationen in absteigender Reihenfolge am besten eignen:

0.68 - 0.76 μm
1.55 - 1.75 μm
0.46 - 0.51 μm
0.78 - 0.88 μm
0.56 - 0.61 μm
10.20 - 12.50 μm

Der Erderkundungssatellit Landsat-3, der uns momentan MSS-Daten liefert, nimmt in folgenden Wellenlängenbereichen auf:

MSS-Kanal 4: 0.5 - 0.6 μm
MSS-Kanal 5: 0.6 - 0.7 μm
MSS-Kanal 6: 0.7 - 0.8 μm
MSS-Kanal 7: 0.8 - 1.1 μm

Der Sensor für einen Thermalkanal im Bereich von 10.4 - 12.6 μm konnte nicht in Betrieb gesetzt werden.

Werden diese Angaben miteinander verglichen, muss leider festgestellt werden, dass die für Schneekartierungen äusserst wichtigen Spektralbereiche 1.55 μm - 1.75 μm (Wolken-Schneetrennung) und 0.46 μm - 0.51 μm durch den MSS von Landsat-3 nicht abgedeckt werden können.

Der voraussichtlich im Jahre 1982 startende Landsat-D-Satellit dürfte sich nicht von Landsat-3 unterscheiden, bringt also für Schneekartierungsprojekte keine Verbesserung. Mitte 1983 soll aber Landsat-D-Prime gestartet werden (nach NSSDC, 1980). Er soll mit einem sogenannte Thematic Mapper (TM) - ein optisches Scanner-System mit einer Auflösung von etwa 30 m - ausgerüstet werden. Es umfasst die sieben folgenden Wellenlängenbereiche:

0.45 - 0.52 μm
0.52 - 0.60 μm
0.62 - 0.69 μm
0.76 - 0.90 μm
1.55 - 1.75 μm
2.08 - 2.35 μm
10.40 - 12.50 μm

Dieses Aufnahmesystem eignet sich für Schneekartierungsprojekte besser als das MSS-System von Landsat. Obwohl auch hier der Bereich von 0.68 - 0.76 μm nicht abgedeckt ist, sind alle anderen wesentlichen Spektralbereiche vorhanden.

Daneben gilt es noch weitere, wichtige Probleme zu lösen, die in dieser Arbeit aber nicht behandelt wurden.

An erster Stelle steht das Problem der Ausaperungszone (Kap. E.3.9). Wie aus den Kap. E.11.6.2 bis E.11.6.4 zu entnehmen ist, sind hier die grössten Abweichungen der Klassifikationen gegenüber dem Bodenbild festzustellen. Sicher haben die zum Aufnahmezeitpunkt herrschenden, extremen Bedingungen das automatisierte Klassieren von Randzonen besonders schwierig gestaltet. Untersuchungen von Landsat-Daten während der effektiven Schmelzzeit (STIRNEMANN, 1977) bestätigen, dass, mindestens in waldlosen Gebieten, das Ausaperungsproblem bei weniger extremen Schnee-Eis-Bedingungen stark von seiner Problematik verliert. Um aber während der Ausaperungsphase genaue Kenntnisse über den Verlauf der Schneegrenze zu erhalten, muss dem Problem der Ausaperungszonen in Zukunft dennoch grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Eine Lösungsmöglichkeit bietet sich in der Anwendung von Ratiowerten an, d.h. es werden Verhältnisswerte zweier Spektralkanäle gebildet, die dann ins Klassifikationsverfahren einbezogen werden. Dadurch soll nach STAENZ, 1976, eine bessere Trennung besonders von "Problem"-Kategorien möglich sein.

In der Zeit der Schneeschmelze beschäftigt uns nicht nur die momentane Ausdehnung der zu untersuchenden Schneefläche, sondern auch, wie sie sich in einem bestimmten Zeitraum verändert hat. Um über den Stand dieser Veränderungen immer genau informiert zu sein (change detection), muss multitemporal gearbeitet werden, d.h. die Daten von verschiedenen Aufnahmezeitpunkten müssen miteinander verglichen werden können. Dieser komplexe Problembereich wurde in dieser Arbeit weggelassen, weil nur Daten von einem Skylab-Ueberflug erhältlich waren. LICHTENEGGER (1980) zeigt in seiner Dissertation (mit Landnutzungskategorien) aber Lösungswege auf.

Im Hinblick auf einen routinemässigen Einsatz von automatisierten Verfahren muss eine umfassend gültige Stichprobensammlung in Form einer Datenbank angelegt werden, um den zeit- und kostenmässig stark ins Gewicht fallenden Aufwand einer Stichprobenanalyse einschränken zu können. Um dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen, müssten die Daten aber u.a. wegen der atmosphärischen Störeffekte zuerst mit Hilfe eines Atmosphärenmodells standardisiert werden (STAENZ, 1978). Die Erfüllung dieser Forderung bedingt, wie schon in Kap. B.4.3 erwähnt, einen grossen Aufwand, der sich für einen routinemässigen Auftrag aber sicher lohnen würde.

Da in der Schweiz praktisch immer mit Wolkenbedeckung gerechnet werden muss und momentan der Landsat-Erderkundungssatellit nur alle 18 Tage (in Zukunft alle 16 Tage) Bodenaufnahmen von einem bestimmten Gebiet machen kann, ergibt sich hier ein weiterer Problemkreis. Was geschieht, wenn gerade in der entscheidenden Phase der Schneeschmelze eine starke Bewölkung vorherrscht und das Einzugsgebiet eines Flusses teilweise oder ganz von Wolken verdeckt ist ?

Es bestehen Ideen, wie das Problem mindestens bei teilweiser Bewölkung gelöst werden könnte. Der Schneegrenzverlauf im Untersuchungsgebiet muss über Jahre hinweg genau aufgezeichnet werden. Mit Korrelationsverfahren sollte es dann möglich sein, aus der Kenntnis der momentanen Lage von einzelnen wolkenfreien Abschnitten auf den Gesamtverlauf der Schneegrenze zu schliessen.

Eine weitere Lösungsmöglichkeit bietet sich zukünftig in der Anwendung von Mikrowellen-Aufnahmesystemen an. Da Mikrowellen (>3 cm) die Wolken durchdringen können, wären sie für operationelle Schneeflächenkartierungen von grösstem Nutzen. Leider hat aber die Forschung auf diesem Gebiet erst richtig begonnen, so dass hier in nächster Zukunft noch keine Resultate für eine operationelle Anwendung erwartet werden können.

Damit die Schneefläche als Parameter in ein Abflussmodell einbezogen werden kann, muss vorausgesetzt werden, dass sie möglichst genau ausgemessen wurde, sei es mit analogen oder digitalen Methoden. Gerade in Gebirgsregionen entsteht aber, wie in dieser Arbeit auch, allein durch die Messung der Orthogonalprojektion der wahren Oberfläche ein nicht unbeträchtlicher Fehler (GFELLER, 1975). Im Hinblick auf ein operationelles Schneeeinformationssystem müsste deshalb für ein bestimmtes Einzugsgebiet ein digitales Geländemodell entwickelt werden, das als zusätzlicher "Kanal" in das Klassifikationsverfahren einbezogen werden kann. URFER, 1978 hat mit einem relativ groben Höhenmodell erfolgreich Versuche in dieser Richtung unternommen. Mit einem detaillierten Modell wäre eine exaktere Flächenbestimmung von Schnee auch im Gebirge möglich.

G. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit war es, einen preiswerten und dennoch genau arbeitenden Klassifikationsalgorithmus für grossräumige Schneekartierungsprojekte im Hochgebirge zu finden. Um über den Zustand des für eine Abflussprognose äusserst wichtigen Parameters "Schneefläche" immer genau Kenntnis zu haben, muss periodisch Datenmaterial vom gesamten Einzugsgebiet zur Verfügung stehen, was nur mit Verwendung von Satellitendaten möglich ist. Die grossen Datenmengen, die von den Satellitenaufnahmen anfallen, müssen mit geeigneten Verfahren rasch und umfassend verarbeitet werden können. Mit automatisierten Klassifikationsverfahren lässt sich diese Aufgabe am besten lösen. Die Vorteile gegenüber analogen Verfahren wie Schnelligkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erfordern aber eine intensive Forschungsarbeit, damit die automatisierten Klassifikationsverfahren auch operationell angewendet werden können.

Aufbauend auf den bisherigen Grundlagenforschungen wurde in dieser Arbeit versucht, einige spezifische Probleme der operationellen Anwendung von digitalen Methoden zur Schneeflächenkartierung zu lösen.

Gearbeitet wurde mit Skylab-Multispektralscanner-Daten vom 11. September 1973. Der Scanner lieferte Daten von 13 verschiedenen Spektralbereichen, die vom UV bis in den thermalen Infrarotbereich reichen. Für eine methodische Untersuchung stellt dies eine wesentlich günstigere Voraussetzung dar als z.B. der Landsat-3-Multispektralscanner mit nur vier Kanälen.

Als geeignetes Untersuchungsgebiet wurde die Region Mt. Blanc - südliche Walliser Hochalpen - Simplon ausgewählt, da dort im Aufnahmezeitpunkt die flächenmässig grössten Schneegebiete lagen und die relativ geringe Bewölkung eine Untersuchung zulies. Für die Detailarbeit wurde innerhalb dieser Grossregion eine kleinere Testfläche im Mischabelgebiet ausgesucht.

Die eigentliche Interpretation der Magnetbanddaten wurde sowohl mit überwachten (sog. "supervised") als auch mit nicht überwachten ("unsupervised") Verfahren durchgeführt. Daraus wurden in Vergleichsverfahren die für die Schneekartierung besten Klassifikationsalgorithmen ermittelt.

Der ganze Arbeitsablauf gliedert sich in sieben Schritte.

Die erste Stufe diente der Datenvorverarbeitung. Die Magnetbanddaten mussten so organisiert werden, dass damit auf den zur Verfügung stehenden Rechenanlagen gearbeitet werden konnte. Von den ursprünglich 13 Spektralkanälen musste einer (0.41-0.46 μm) eliminiert werden.

Die zweite Stufe befasste sich mit der Auswahl von Stichproben, mittels denen der gesamte Datensatz klassifiziert werden sollte. Um eine umfassende Stichprobensammlung zu erstellen, wurden verschiedene Verfahren geprüft. Die Abgrenzung der Stichproben musste mit besonderer Sorgfalt vorgenommen werden, da sie die Aussagekraft der Klassifikationsergebnisse stark beeinflusst. Um eine möglichst grosse Homogenität der Stichproben zu erreichen, wurden statistische Untersuchungen (v.a. Mittelwert, Standardabweichung) durchgeführt. Allfällige "Ausreisser" konnten so eliminiert werden.

Die dritte Stufe beinhaltete die Klassifikation der ermittelten Landschaftselemente (42 Kategorien, gruppiert in zwei Hauptkategorien "Schnee-Eis" und "schneefreie Zone"). Vorerst wurde der Datensatz des Testgebietes mit den verfügbaren Algorithmen (DCLAS, MCLAS, CLUS) unter Verwendung sämtlicher Kanäle (12) und Kategorien (42) klassiert. Damit wird gezeigt, wie genau unter Ausschöpfung aller zur Verfügung stehenden Mittel eine Schneefläche mit automatisierten Verfahren klassiert werden kann. Als Ergebnis darf festgehalten werden, dass sich die Cluster-Analyse (unüberwachte Verfahren) für Schneeflächenkartierungen nicht eignet. Mögliche Anwendungsbereiche von Gruppierungsverfahren finden sich aber bei der Stichprobenanalyse, insbesondere der Abgrenzung homogener Stichproben. Statistische Probleme wegen war es bei der MCLAS-Klassifikation nur möglich, acht der zwölf zur Verfügung stehenden Kanäle zu benutzen.

Die vierte Stufe diente der Kanal- und der Kategorienreduktion. Mit Hilfe einer schrittweisen Diskriminanzanalyse wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Bedeutung der Spektralkanäle für eine automatisierte Schneeflächenbestimmung in hierarchischer Reihenfolge bestimmt werden kann. Mittels Stichprobenklassifikationen sowie Klassifikationen im Testgebiet wurde anschliessend die minimal notwendige Anzahl Kanäle festgelegt, die zur Erreichung bestimmter Genauigkeitskriterien notwendig waren. Für Schneekartierungen müssen im allgemeinen sechs Kanäle, für unser Testgebiet nur deren fünf verwendet werden (Rangfolge: 0.68-0.76 μm , 1.55-1.75 μm , 0.46-0.51 μm , 0.78-0.86 μm , 0.56-0.61 μm , 10.2-12.5 μm). Mit Abstandsvergleichen der Mittelwerte der einzelnen Kategorien zueinander im n-dimensionalen Merkmalsraum gelang es ferner, die Anzahl der Kategorien der Hauptkategorie "schneefreie Zone" um nicht weniger als 62 % zu reduzieren. Dies war nur möglich, weil sämtliche "schneefreien" Kategorien, die zur Abgrenzung der Schneefläche nichts beitrugen, als irrelevantes Informationsmaterial eliminiert wurden.

Die fünfte Stufe befasste sich mit den Klassifikationen mit reduzierter Kanal- und Kategorienzahl. Mit dem DCLAS-Algorithmus mit fünf Kanälen (ursprünglich 12) und 23 Kategorien (ursprünglich 42) liess sich die Computer-Rechenzeit um 55 %, mit dem MCLAS-Algorithmus um 67 % reduzieren. Mit Einbezug von Inkrement 2 konnte die Rechenzeit ohne signifikanten Informationsverlust um den Faktor 3 verkleinert werden.

Die sechste Stufe beinhaltet eine räumliche, qualitative Ueberprüfung der Klassifikationsresultate des Testgebietes. Dazu mussten die klassifizierten Daten aber vorerst bildhaft dargestellt werden. Mit Hilfe des Photomation-Systems des Instituts für Kommunikationstechnik der ETH Zürich konnten die gewonnenen Resultate geometrisch korrigiert und im gewünschten Massstab in kartenähnlicher Form aufbelichtet werden. Die so aufbereiteten Klassifikationen wurden mit einer, die Schnee- und Eisverhältnisse im Aufnahmezeitpunkt möglichst genau wiedergebenden Bodenkarte hinsichtlich ihrer Genauigkeit verglichen. Ein Versuch, die Bodenkarte zu digitalisieren, um die Abweichungen der Klassifikationen von der Bodenkarte auch quantitativ zu erfassen, scheiterte. Die Bodenkarte konnte zu wenig genau digitalisiert werden. In einem analogen Verfahren konnte dagegen durch Ueberlagerung des Bodenbildes auf die Klassifikation ein optischer Vergleich durchgeführt werden. Dabei zeigte sich, dass der MCLAS-Algorithmus gegenüber dem einen viel einfacheren Aufbau aufweisenden, deterministischen DCLAS-Algorithmus etwas genauere Ergebnisse liefert. Dennoch genügt die DCLAS-Klassifikation mit fünf Kanälen und 23 Klassen den gestellten Anforderungen einer Schneeflächenkartierung vollauf. Da der Rechenzeitaufwand dieses Algorithmus gegenüber dem auf Wahrscheinlichkeitsprinzipien basierenden MCLAS-Algorithmus um 72 % niedriger liegt, sollten grossräumige Schnee-Eis-Klassifikationen nur mit dem DCLAS-Algorithmus durchgeführt werden.

Die siebte Stufe beinhaltet die Anwendung und Ueberprüfung der im Testgebiet ermittelten Klassifikationsparameter im Untersuchungsgebiet. Auch über eine grössere Gebirgszone hinweg mit sehr unterschiedlichen Schneebedingungen und atmosphärischen Zuständen ergibt der DCLAS-Algorithmus mit derselben Stichproben-Konfiguration genügend genaue Ergebnisse. Die Forderung, ein grösseres Einzugsgebiet für die Berechnung von Abflussprognosen digital zu erfassen, kann mindestens bei einigermaßen guten Sichtverhältnissen mit relativ geringen Kosten genügend genau gelöst werden.

H. LITERATURVERZEICHNIS

AEROSPACE AND DEFENSE SYSTEMS OPERATIONS, 1973: Earth Resources Production Processing Requirements. EREP Electronics Sensors. Doc. No. Pho-TR524, Philco Ford Corp. for NASA/Johnson Space Center, Houston, Texas, USA.

ALFOELDI T.T., 1976: Digital Analysis of Landsat MSS Imagery for Snow Mapping Application. Energy, Mines and Resources, Canada.

ASP, 1975: Manual of Remote Sensing. Vol. I + II, Falls Church, Virginia, USA.

BARNES J.C. et al, 1974: A Study to Develop Improved Spacecraft Snow Survey Methods Using SKYLAB/EREP Data: Demonstration of the Utility of the S190 and S192 Data. ERT Doc. 1012-7, Interim Report to NASA/Johnson Space Center, Houston, Contact No. NAS 9-13 305, Environmental Research and Technology Inc., Lexington, Massachusetts, USA.

BARNES J.C. + BOWLEY C.J., 1974: Handbook of Techniques for Satellite Snow Mapping. Final Report. ERT-Doc. 0407-A, NAS 5-21803, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Environmental Research and Technology Inc., Concord, Massachusetts, USA, 95 p.

BARNES J.C. + BOWLEY C.J., 1974: Skylab-4 Visual Observations Project: Snow Mapping Experiment. Final Report, Contact No. NAS 9-13974, Environmental Research and Technology Inc., Concord, Massachusetts.

BARNES J.C. + BOWLEY C.J., 1975: Snow Survey from Space with Emphasis on the Results of the Analysis of Skylab EREP S192 MSS Data, Proc. NASA Earth Resources Survey Symposium, Vol. 1-D, Houston, Texas, USA.

BARNES J.C. et al, 1975: Study to Develop Improved Spacecraft Methods Using Skylab/EREP Data. ERT-Doc. 0412-F, Final Report to NASA, Contact NAS 9-13305, NASA/Johnson Space Center, Houston, Environmental Research and Technology Inc., Concord, Massachusetts, USA.

BARNES J.C. et al, 1977: Snow Mapping Experiment. Publ. Skylab Explores the Earth, NASA Doc. Sp-380, Washington D.C., USA.

BARNES J.C. + BOWLEY C.J., 1977: Study of Near-Infrared Snow Reflectance Using Skylab Multispectral Scanner Data. ERT Doc. 1474-F, Final Report to Dept. of Commerce, NOAA/NESS, Washington D.C., USA.

BARTOLUCCI L.A. et al, 1975: Snowcover Mapping by Machine by Processing of Skylab and Landsat MSS Data. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.

BATSCHULET E., 1973: Introduction to Mathematics for Life Scientists. Springer Verlag New York, Heidelberg, Berlin.

- BENDIX AEROSPACE SYSTEMS DIVISIONS, 1974: Multispectral Data Analysis System. BSR 4146B, Ann Arbor, Michigan, USA.
- BINZEGGER R., 1976: ERTS-Multispektraldaten als Informationsquelle für thematische Kartierungen. Diss. Univ. Zürich.
- BOCK H.H., 1970: Automatische Klassifikation. in: WALTER E. (Edit.), Statistische Methoden II, Lect.Nts. Op. Res. 8th Math. Systeme., Vol. 39, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- CHANG T.C. + ISAACS R.G., 1975: Experimental Evaluation of Atmospheric Effects on Radiometric Measurements Using the EREP of Skylab. Final Report. Contact No. NAS 9-13343, Environmental Research and Technology Inc., Concord, Massachusetts, USA.
- CHANG T.C. + GLOERSON P., 1975: Microwave Emission from Dry and Wet Snow. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- COOLEY W.W. + LOHNES P.R., 1971: Multivariate Data Analysis. John Wiley & Sons Inc., New York, London, Sydney, Toronto.
- DALLAM W.C., 1975: Digital Snow Mapping Techniques Using Landsat Data and General Electric Image 100 System. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- DIXON W.J. (Edit.), 1970: BMD Biomedical Computer Programs. Univ. of California Press, Berkeley, Los Angeles, London.
- DUDA R.O. + HART P.E., 1973: Pattern Classification and Scene Analysis. John Wiley & Sons Inc., New York, London, Sydney.
- DUDEWICS E.J., 1976: Introduction to Statistics and Probability. Holt, Rinehart and Wilson, New York.
- FASLER F., 1978: IBIS - Ein interaktives Bildinterpretationssystem. Proc. ISP Comm. VII, IUFRO Int. Symp. on Remote Sensing, Int. Archives of Photogrammetry, XXII-7, Vol. I, Freiburg, BRD.
- GFELLER R.E. + SEIDEL K., 1975: Automatisierte Schneeflächenbestimmung mit digitalen Multispektraldaten des ERTS-1. Geographica Helvetica 30/3.
- GFELLER R.E., 1975: Untersuchungen zur automatisierten Schneeflächenbestimmung mit Multispektralaufnahmen des Erderkundungssatelliten ERTS-1. Diss. Univ. Zürich.
- GUDMANDSEN P., 1977: Measurement of Snow and Ice Cover. Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology, ISPRA-Courses, Part B, RS/A-B/77/B3, JRC, Ispra, Italy.
- HABERAECKER P., 1977: Untersuchungen zur Klassifizierung multispektraler Bilddaten aus der Fernerkundung. DLR-FB 77-72, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR), Oberpfaffenhofen, BRD.
- HAEFNER H., 1975: Möglichkeiten und Grenzen der Dateninterpretation, zur Methodik der Interpretation von Fernerkundungsdaten. Festschrift Dr.h.c.L.Bertele, Wild Heerbrugg.

- HAEFNER H., 1975: Snow Survey and Vegetation Growth in the Swiss Alps. Final Report to NASA Swiss EREF/Skylab Project No. 323, Dept. of Geography, University of Zurich.
- HAEFNER H. + ITTEN K., 1976: Snow Studies by Satellites in Switzerland. Paper, Int. Working Seminar on Snow Studies by Satellites, WMO, Geneva.
- HAEFNER H., 1977: Snow Mapping and Land Use Studies in Switzerland. Final Report to NASA, Swiss Landsat-2 Project No. 29760, Dept. of Geography, University of Zurich.
- HAEFNER H. + MURI R., 1978: Methodology of Snowmapping from Satellites. Proc. ISP Comm. VII, IUFRO Int. Symp. on Remote Sensing, Int. Archives of Photogrammetry, XXII-7, Vol. III, Freiburg, BRD.
- HANDBOOK of Geophysics and Space Environments S.L. Valley. Ed., Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York, USA.
- HANNAFORD J.F., 1977: Investigation-Application of Satellite Imagery to Hydrologic Modeling Snowmelt Runoff in the Southern Sierra Nevada, Phase I. Final Report to NASA/Goddard Space Flight Center, NAS 5-22957, Greenbelt, Maryland, USA.
- HOFFER R.M., 1977: Measurements of Snow and Ice Cover, Techniques and Results of Computer-Aided Analysis of Aircraft and Satellite MSS Data for Mapping Snow Cover and Water Resources. Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology, Ispra-Courses, Part B, JRC, Ispra, Italy.
- HOVIS W.H. et al, 1971: Spectra of Reflected Solar Energy 0.4 to 3.4 Microns: Clouds, Snow, Fields. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA.
- ITTEN K.I., 1969: Geographische Interpretation von Wettersatellitenbildern. Diplomarbeit, Geogr. Institut, Univ. Zürich.
- ITTEN K.I., 1973: Die Verwendung thermaler Infrarot-Aufnahmen bei Geographischen Untersuchungen. Diss. Univ. Zürich.
- ITTEN K.I., 1975: Approaches to Digital Snow Mapping with Landsat-1 Data. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- ITTEN K.I. + FASLER F., 1979: Thematic Adaptive Spatial Filtering of Landsat Landuse Classification Results. Proc. 13th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, USA.
- KHORRAM S., 1977: Remote Sensing-Aided Systems for Snow Quantifications, Evapotranspiration Estimation, and Their Application to Hydrologic Models. Proc. 11th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, USA.
- LANDSAT DATA USER'S HANDBOOK, 1979: Revised Edition, U.S. Geological Survey.
- LANDGREBE D., 1972: Systems Approach to the Use of Remote Sensing, in: Int. Workshop on Earth Res. Survey Systems, Vol. 1, Washington D.C., USA.

- LEAF C.F., 1975: Applications of Satellite Snowcover in Computerized Short-Term Streamflow Forecasting. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- LICHTENEGGER J., 1980: Landnutzungskartierungen mit multitemporalen Landsat-MSS-Daten. Diss. Univ. Zürich.
- LILLESAND T.M., 1976: Fundamentals of Electromagnetic Remote Sensing. State Univ. of New York, Syracuse, New York, USA.
- LINDENLAUB J.C., 1973: Guide to Multispectral Data Analysis Using LARSIS. Lab. for Appl. of Remote Sensing, Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, USA.
- LUTHER S.G. et al, 1975: Snow Cover Monitoring by Machine Processing of Multitemporal Landsat MSS Data. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- MARTINEC J., 1976: Possibilities and Obstacles in the Hydrological Exploitation of Satellite Data. Int. Working Seminar on Snow Studies by Satellites, WMO, Geneva.
- MARTINEC J., 1977: Hydrologic Basin Models, Types Runoff Models, Monitoring of the Seasonal Snow Cover, Evaluation of Remote Sensing Data Computations of the Snowmelt Runoff. Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology, ISPRA-Courses, Part B, RS/A-B/C3, JRC, Ispra, Italy.
- MEIER M.F., 1974: New Ways to Monitor the Mass and Areal Extent of Snowcover. Proc. COSPAR-Symp., Approaches to Earth Survey Problems through the Use of Space Techniques, Akademie-Verlag, Berlin.
- MEIER M.F. + EVANS W.E., 1975: Comparison of Different Methods for Estimating Snow Cover in Forested, Mountainous Basins, Using Landsat Images. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- MEISEL W.S., 1972: Computer Oriented Approaches to Pattern Recognition, Mathematics in Science and Engineering, Vol. 83, Acad. Press Inc., New York, London.
- MESSERSCHMITT, BOELKOV, BLOHM, 1973: Untersuchung des Nutzens der Fernerkundung der Erde mit den Mitteln der Weltraumtechnik. Gesellschaft für Weltraumtechnik, München, BRD.
- MISSION Requirements and Operational Team, 1973: Skylab Program EREP Investigator's Information Book. P.I. Managements Offices Science and Applications Directorate, NASA/Johnson Space Center, Houston, Texas, USA.
- MURI R., 1976: Automatisierte Trennung von Schnee und Wolken im Satellitenbild mit Hilfe von Skylab/EREP-Daten. Diplomarbeit, Geogr. Institut, Univ. Zürich.
- MURI R., 1978: Grossraumklassifikationen von Schnee und Wolken mit MSS-Daten. Proc. ISP Comm. VII, IUFGRO Int. Symp. on Remote Sensing, Int. Archives of Photogrammetry, XXII-7, Vol. III, Freiburg, BRD.

- NASA, 1971: Skylab EREP Users Handbook. Manned Spacecraft Center, Houston, Texas, USA.
- NASA, 1974: Earth Resources Data Catalog. Johnson Space Center, Houston, Texas, USA.
- NIEMANN H., 1974: Methoden der Mustererkennung. Akad. Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, BRD.
- NILSON N.J., 1965: Learning Machines. Mc Graw-Hill Book Company, New York, London.
- NSSDC, WDC-A-R8S, 1980: Report on Active and Planned Spacecraft and Experiments, Greenbelt, Maryland, USA.
- NUESCH D., 1977: Landnutzungsinterpretation mit Hilfe multispektraler Abtastverfahren. Diss. Univ. Zürich.
- O'BRIAN H.W. + MUNIS R., 1973: Red and Near-Infrared Spectral Reflectance of Snow. CRREL Research Report, Hanover, New Hampshire, USA.
- O'BRIAN H.W. + MUNIS R., 1975: Red and Near-Infrared Spectral Reflectance of Snow. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- ØDEGAARD H.A., 1974: The Application of ERTS Imagery to Mapping Snow Cover in Norway. Final Report, ERTS-1 Contract NASA F-418, Oslo, Norway.
- ØDEGAARD H.A. + ØSTREM G., 1977: Application of Satellite Data for Snow Mapping. Final Report No. 9-77, Norges Vassrags- og Elektrisitetsvesen, Oslo, Norway.
- ORSER-SSEL, Technical Report II-73, 1973: Aircraft Multispectral Scanner Digital Data, User's Manual. Pennsylvania State Univ., University Park, Pennsylvania, USA.
- ØSTREM G., 1976: Operational Use of Snow and Ice Information for Water Power Production in Norway. Paper Int. Working Seminar on Snow Studies by Satellites, WMO, Geneva.
- RANGO A., 1976: Results of NASA Snow Studies. Paper Int. Working Seminar on Snow Studies by Satellites, WMO, Geneva.
- RANGO A. + ITTEN K.I., 1976: Satellite Potentials in Snow Cover Monitoring and Runoff Prediction. Nordic Hydrology, No. 7.
- RANGO A., 1978: Pilot Tests of Satellite Snowcover/Runoff Forecasting Systems. Proc. 46th Annual Western Snow Conference, Otter Rock, Oregon, USA.
- RANGO A., 1979: Remote Sensing of Snow and Ice: A Review of Research in the United States 1975-1978: NASA Technical Memorandum 79713, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA.
- SACHS L., 1964: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- SACHS L., 1974: Angewandte Statistik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

- SEIDEL K., 1976: Digitale Bildverarbeitung. Technischer Bericht, Photographisches Institut ETH, Zürich.
- STAENZ K., 1976: Radiometrische Untersuchungen über das Reflexionsverhalten von Schnee. Ein Beitrag zur Automatisierung grossflächiger Schneekartierung mit Spektraldaten des Erderkundungssatelliten Landsat-2. Diplomarbeit, Geogr. Inst. Univ. Zürich.
- STAENZ K., 1978: Atmosphärische Korrekturen von Multispektraldaten des Erderkundungssatelliten Landsat-2. Diss. Univ. Zürich.
- STEINER D. + HAEFNER H., 1965: Tone Distortion for Automated Interpretation. Photogrammetric Engineering, No. 31.
- STEINER D., 1972: Geographical Data Sensing, in: TOMLINSON R.F. (Edit.), Geogr. Data Handling, Vol. 1, Ottawa, Ontario, Canada.
- STEINER D., HELTH V., TURNER H., 1973: Digital Image Processing for the Automatic Mapping of Terrain Cover Types and Ground Parameters. Dept. of Geogr., Univ. of Waterloo, Canada.
- STEINER D. + OSTHEIDER M.: Berichte und Scripten zur quantitativen Geographie, Multivariate Analyse für Geographen, Teil III, "Gruppierungsanalyse". Geogr. Inst. ETH Zürich (in Bearbeitung).
- STIRNEMANN H.P., 1977: Schneedecke und Schneegrenzzone in Satellitenaufnahmen. Ein Vergleich mit Luftbildern und Bodeninformationen. Diplomarbeit, Geogr. Inst. Univ. Zürich.
- THOMPSON A.G., 1975: Utilization of Landsat Monitoring Capabilities for Snowcover Depletion Analysis. Operational Applications of Satellite Snowcover Observations, NASA SP-391, Washington D.C., USA.
- UEBERLA K., 1968: Faktorenanalyse. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- URFER H.P., 1978: Routinemässige Schneekartierung in hydrologischen Einzugsgebieten mit Landsat-Daten. Diplomarbeit, Geogr. Inst. Univ. Zürich.
- WACKER A.G. + LANDGREBE D.A., 1972: Minimum Distance Classification in Remote Sensing. Purdue Univ. LARS Note 030772, West Lafayette, Indiana, USA.
- WALTER E. (Edit.), 1970: Statistische Methoden II. Lect. Nts. Op. Res. & Math. Systems, Vol. 39, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- WESTPHAL W., 1959: Lehrbuch der Physik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- WILHELM F., 1975: Schnee- und Gletscherkunde. W.de Gruyter, Berlin, New York.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1971: Snow Survey from Earth Satellites. A Technical Review of Methods, Report WMO/IHP Projects, WMO No. 353, Geneva.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1976: International Working Seminar on Snow Studies by Satellites. Geneva.

LEBENS LAUF

von René Muri, geboren am 21. April 1951 in Neuenhof, Bürger von Winikon, LU.

Nach dem Besuch der Primar- und Bezirksschule (1963-1967) in Teufenthal und Unterkulm (AG), begann 1967 meine Seminarzeit in Aarau, die ich 1971 mit dem aargauischen Lehrerpateant abschloss. Nachdem ich 1½ Jahre an der Oberstufe in Buchs (AG) unterrichtet hatte, immatrikulierte ich mich im Herbst 1972 an der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich mit dem Hauptfach Geographie. Bei folgenden Dozenten besuchte ich Vorlesungen und Übungen:

Geographie:	Bachmann, Boesch, Bögli, Bär, Egli, Elsasser, Fitze, Flüttsch, Furrer, Gutermann, Guyan, Haefner, Itten, Kaiser, Kishimoto, Leemann, Müller, Ram-bousek, Schmid, Stammherr, Steffen, Steiner, Tanner, Zweifel
Geologie und Petrographie/ Kristallogr.:	Büchi, Dal Vesco, Dietrich, Escher, Fricker, Gansser, Grünenfelder, Hantke, Hsu, Jäckli, Milnes, Signer, Trommsdorff, Trümpy, Weibel
Anthropologie:	Biegert, Glaser, Hunsperger, Kubik, Scheffrahn
Mathematik und EDV:	Batschelet, Bauknecht, Gabriel, Gross, Karrer, Würgler (ETH)
Chemie:	Eugster, Philipsborn, Wagnière, Werner
Paläontologie:	Hünemann, Kuhn-Schnyder
Klimatologie/ Meteorologie:	Dütsch (ETH), Gensler, Kuhn, Schüepp
Didaktik und Pädagogik:	Inhelder, Woodtli
Bildwissen-schaften:	Berg, Seidel (ETH)

Im Wintersemester 1976 erwarb ich das Diplom für Naturwissen-schaftler mit Hauptfach Geographie (Nebenfächer: Mathematik, Geologie, Petrographie/Kristallographie, Chemie, Anthropologie). Im Frühjahr 1977 begann ich die Arbeiten für meine Dissertation unter der Leitung von Prof.Dr.H.Haefner.

Vom Januar 1977 bis Ende 1979 war ich als wissenschaftlicher Assistent am Geographischen Institut der Universität Zürich unter Herrn Prof.Dr.H.Haefner tätig. Seit Herbst 1974 unter-richte ich als Hilfslehrer für Geographie und Mathematik an der Kantonalen Schule für Berufsbildung, Aarau.

